

UNIVERSIDAD DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS
Sección de Químicas



TESIS DOCTORAL

Contribución al estudio de la permeabilidad del hormigón al aire

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Rafael Muñoz Martialay

Madrid, 2015



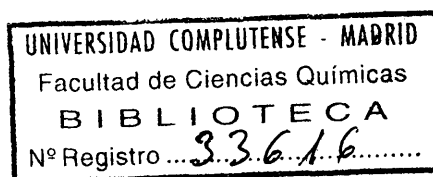
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE



5326699043

11
66.0
MUN

CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA PER-
MEABILIDAD DEL HORMIGON AL AIRE.



Rafael MUÑOZ MARTIALAY

Junio, 1975

b25096667
i37574267

Este trabajo ha sido realizado en el Instituto "Eduardo Torroja" del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, que ha facilitado todos los medios e instrumentación necesarios para llevarlo a efecto; por lo que el autor expresa su agradecimiento.

Igualmente, desea agradecer, de manera especial, al Catedrático de la Universidad Complutense Don Angel Vian Ortuño - sus opiniones, consejos y valiosa ayuda y al Profesor de Investigación Don José María Tobío Sillero sus orientaciones y aportaciones; así como, el que haya llevado la dirección del mismo.

I N D I C E

I.- INTRODUCCION

II.- ANTECEDENTES

III.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

III.1.- Generalidades.

III.2.- Estructura del hormigón.

III.2.1.- Características de los materiales.

III.2.2.- Dosificación y fabricación del hormigón.

III.2.3.- Porosidad del hormigón.

III.3.- Características del aire.

IV.- TRABAJO EXPERIMENTAL

IV.1.- Descripción del permeabilímetro.

IV.2.- Fabricación de las probetas de hormigón.

IV.3.- Puesta a punto y ensayos previos.

IV.3.1.- Puesta a punto del dispositivo de ensayo.

IV.3.2.- Ensayos previos.

IV.3.2.1.- Reproducibilidad del método de ensayo.

IV.3.2.2.- Estabilidad de la estructura de las probetas.

IV.3.2.3.- Isotropismo axial del material.

IV.3.2.4.- Impermeabilización: a) Comportamiento de distintos tipos de impermeabilizantes.

b) Influencia de la impermeabilización.

IV.4.- Ensayos sistemáticos y resultados obtenidos.

IV.5.- Análisis de los resultados obtenidos.

IV.5.1.- Influencia de la diferencia de presión entre las superficies opuestas de la probeta.

IV.5.2.- Influencia del tipo de dosificación.

IV.5.3.- Influencia del secado de la masa de hormigón.

IV.5.4.- Influencia del espesor del hormigón.

IV.5.5.- Coeficientes de permeabilidad.

V.- CONCLUSIONES

Referencias bibliográficas.

Bibliografía.

CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA PERMEABILIDAD DEL HORMIGON AL AIRE

I.- INTRODUCCION

Conocer la permeabilidad al aire que ofrece el hormigón es - necesario cuando se pretende construir, con este material, - depósitos para gas, cámaras de vacío, edificios nucleares, - conductos, etc., y, especialmente, cuando se quiere emplear el hormigón por sus cualidades físico-químicas o de economía, en sustitución de cualquier otro tipo de material de los que corrientemente se utilizan y que se sabe ofrecen la suficiente impermeabilidad para el fin a que se destinan.

Por otra parte, si se tiene en cuenta que la densidad del - hormigón influye decisivamente en sus propiedades físicas de resistencia, conductividad térmica, transmisión de vapor, - etcétera, y que está íntimamente relacionada con la porosidad, y por lo tanto, con la permeabilidad a los gases, que - son los que facilitan la carbonatación de la cal y la corrosión de las armaduras, resulta obvio el interés que ofrece - la obtención del coeficiente de permeabilidad al aire del - hormigón.

Finalmente, la posibilidad de determinar, de un modo relati-

vamente sencillo, la permeabilidad al aire de cualquier tipo de hormigón puede abrir un camino para iniciar la búsqueda de una relación que ligue dicha permeabilidad con la resistencia, porosidad, capilaridad, absorción de agua, etc., y, también, puede facilitar en ciertos casos la determinación de la superficie específica de la masa de hormigón.

II.- ANTECEDENTES

Si bien, siempre se ha prestado atención al problema del paso de un fluido a través de un medio poroso por ser un fenómeno frecuente en numerosos campos, como: física del suelo, estanquidad, análisis y separación de fluidos, transformaciones físicas y químicas, etc., es relativamente reciente la aparición de bibliografía sobre la permeabilidad a los gases que ofrecen los medios porosos, siendo la mayor parte de los trabajos que se han publicado, posteriores al año 1940 y de éstos muy pocos los que se refieren específicamente al hormigón, como medio poroso.

El primer trabajo experimental que ya ofrece una aportación interesante al conocimiento de la permeabilidad al aire del hormigón es el de Kurt Walz (1) publicado en el año 1943 en el que describe los ensayos realizados sobre probetas cilíndricas de hormigón de 22 cm de diámetro y 12 cm de altura. Las dosificaciones empleadas fueron de 240, 300 y 350 kg de cemento por metro cúbico de hormigón y la fabricación se realizó de acuerdo con las normas DIN. Las presiones a que se sometieron las probetas variaron de 0,5 a 5 kp/cm^2 , y se ana

lizó la influencia del secado y la eficacia de la protección lateral de las probetas, para evitar los efectos de borde. - Entre otras, se llegó a la conclusión de que la permeabilidad al aire no guardaba relación con la permeabilidad al agua.

A esta misma conclusión llegó Yoshu (2), en el año 1954, como consecuencia de los resultados experimentales que obtuvo sobre hormigones puzolánicos y de escorias de alto horno, a los que se habían añadido aireantes. Un trabajo complementario de éste es el de Watenabe (3), publicado en 1958, en el que presentó los resultados obtenidos con hormigones de 270 a 350 kg de cemento por metro cúbico de hormigón y en el que también dedujo que el empleo de cenizas volantes no tiene - ningún efecto sobre la permeabilidad.

Finalmente, entre estos trabajos fundamentalmente experimentales, sobre la permeabilidad a los gases del hormigón, hay - que citar el debido a Huart (4) que lo orientó desde el punto de vista de la influencia que la penetración del aire en la masa de hormigón armado tenía en la corrosión de las armaduras. Al principio de su trabajo, el autor, describe el dispositivo de ensayo empleado y señala que las dosificaciones de hormigón estudiadas fueron: 200; 300; 400; y 600 kg por metro cúbico de hormigón, con las relaciones agua/cemento: - 0,75; 0,57; 0,48 y 0,37, respectivamente. Las probetas tenían forma cilíndrica de 20 cm de diámetro y 8 cm de altura y las presiones de ensayo llegaron hasta 2 kp/cm^2 , sobre la presión atmosférica. Entre las conclusiones, deducidas de los ensayos, señala la de que a partir de la dosificación de 400 kg de cemento por metro cúbico de hormigón apenas mejora la impermeabilidad.

Todos los investigadores que se han preocupado de la medida de la permeabilidad de un material, como el hormigón, coinciden en que ésta presenta dificultades, como son, la de eliminar o conocer el efecto de borde y el diseño del permeabilímetro. El autor citado en primer lugar, Kurt Walz (1) hace referencia a estas dificultades y comprobó que la impermeabilización de la superficie lateral de las probetas a base de aplicar una capa bituminosa con disolvente no resultaba eficaz; otros autores indican que las superficies laterales de las probetas las impermeabilizaban pero no hacen referencia a si los resultados eran satisfactorios o no. El Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers (5) ha descrito, en distintos números de estos últimos años, diversos permeabilímetros que utilizan los laboratorios de carreteras de Francia y en ellos siempre se plantea el problema de la estanquidad entre la probeta y el anillo de guarda del permeabilímetro; incluso en el número 20, correspondiente a los meses de julio y agosto de 1966, hay una comunicación del laboratorio de Marsella en la que informan que han tenido que interrumpir los ensayos por la dificultad de realizar un aislamiento conveniente entre la parte metálica del anillo, en el que se introduce la probeta, y la propia probeta. El problema que plantean estos laboratorios es sobre la permeabilidad al agua del hormigón a presiones relativamente altas, a veces superiores a los 10 kp/cm^2 . Genet (6) en 1966 publicó un artículo en el que hace una descripción muy detallada del permeabilímetro que diseñó para medir la permeabilidad al agua de probetas cilíndricas de hormigón de 10 cm de diámetro y de alturas comprendidas entre 5 y 10 cm.

También Meulen y Rijk (7), en junio de 1969, han publicado un trabajo en el que describen un permeabilímetro que diseñaron para determinar la permeabilidad del hormigón en probetas cilíndricas de 75 mm de diámetro y 25 mm de altura. No incluyen ningún valor ni resultados obtenidos en las pruebas pero sí hacen mención al sellado de la probeta para eliminar los efectos de borde, citando como impermeabilizantes: asfalto, resina epoxi, grasa y parafina. Hacen una referencia a los resultados negativos que dió el empleo del asfalto, pero no dan ninguna información sobre la eficacia que obtuvieron con los otros productos.

No se ha dispuesto, por no conocer, de publicaciones que se refieran específicamente al problema del paso de aire a través del hormigón desde el punto de vista puramente teórico. Los trabajos consultados son experimentales y sólo en algunos se inicia un estudio teórico, generalmente partiendo de la ecuación de Darcy pero sin llegar a ninguna conclusión ni hacer ningún desarrollo matemático.

Schwiete, Böhme y Ludwig (8) en 1969 presentaron un trabajo en el que incluían unos resultados que demostraban que aparte de la difusión gaseosa normal, en el hormigón, se produce una difusión de superficie. También de los valores obtenidos experimentalmente, a distintas presiones, pudieron deducir la porosidad efectiva y calcular, a partir de ésta, un factor de distribución "laberíntica" de los poros y el radio del poro efectivo. El desarrollo matemático es relativamente corto y sencillo y lo inician partiendo de la ecuación de Fick.

En 1970 los dos primeros científicos citados en el párrafo -

anterior, Schwiete y Böhme (9), vuelven a tratar el tema de la difusión gaseosa indicando que la porosidad efectiva del hormigón la han obtenido experimentalmente empleando probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 2,5 cm de altura. De ella y partiendo de las leyes de Fick deducen el coeficiente de difusión. Al efectuar este estudio comprobaron la existencia de los tres tipos de difusión, ya enunciados con anterioridad: difusión normal o de volumen, molar o de Knudsen y superficial o de Volmer y llegaron, también, a la conclusión de que los poros tubulares del hormigón presentaban un diámetro variable comprendido entre 10 y 14 micras.

Hasta ahora no se ha establecido una relación satisfactoria que ligue la permeabilidad a los gases y a los líquidos de un medio poroso, y menos aún cuando se trata de un medio poroso tan complejo como el hormigón. Ambos fenómenos ofrecen, sin embargo, una cierta analogía en su aspecto teórico y son muy semejantes los dispositivos de ensayo que se emplean en los trabajos experimentales para obtener la permeabilidad a los líquidos o a los gases. Esta puede ser una de las razones de que la mayoría de los científicos que han estudiado el problema de la permeabilidad lo hayan hecho en su aspecto más general, para luego referirlo al agua como fluido; ya que parece ser más fácil, al menos aparentemente, y además tiene una mayor aplicación en la práctica diaria: fabricación de tuberías, depósitos, pilas de puentes, canales, presas, etc.

Por otra parte ha sido recientemente cuando se ha dejado sentir la necesidad de conocer la resistencia que ofrece el hormigón al paso del aire, por haberse comprobado su influencia

en la corrosión de las armaduras metálicas que se colocan dentro del hormigón armado y que se acentúa al plantear elementos estructurales cada vez más esbeltos con lo que quedan, dichas armaduras, con poco recubrimiento. La corrosión es aún mayor cuando se emplea hormigón pretensado, pues al estirarse las barras aumenta el tamaño de los poros del acero y facilitan la entrada del aire en su interior.

Lo anteriormente expuesto puede ser una de las causas de que se encuentre más bibliografía sobre el tema de la permeabilidad al agua que al aire, y, por la analogía existente entre ambos fenómenos y la forma en que generalmente se ha tratado el problema, ha resultado interesante la consulta de algunos de los trabajos publicados referentes al paso del agua a través del hormigón y se han seleccionado aquellos que ofrecen una cierta utilidad en el estudio de la permeabilidad a los gases.

El primero de estos trabajos fué publicado por Nigam (10) en el año 1954. Describe un método y un equipo para efectuar las medidas de permeabilidad del hormigón. Empleó hormigones de distintas dosificaciones y examinó la dependencia de la permeabilidad con otras propiedades físicas. De los resultados dedujo una expresión matemática con la que se obtiene el coeficiente de permeabilidad al agua, en cm/h, en función de las dimensiones de la probeta y del caudal filtrante a una determinada presión.

También en el año 1954, Powers, Copeland, Hayes y Mann (11) describen un permeabilímetro y los distintos métodos que emplearon para la medida de la permeabilidad al agua de las pastas de cemento. Incluyen gran número de resultados y el

estudio lo efectuaron analizando los efectos de distintos tratamientos de endurecimiento y la influencia de la dosificación; llegando, mediante un cálculo matemático, a determinar el coeficiente de permeabilidad.

Tyler y Erlin (12) en 1961 exponen un método de ensayo para medir la permeabilidad al agua de probetas cilíndricas de hormigón, de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, en función de la velocidad de penetración del agua bajo presión, y de la cantidad de agua penetrada en un cierto intervalo de tiempo. Este método es rápido, relativamente sencillo y los resultados son comparables con los que se obtenían, hasta entonces, con los procedimientos clásicos.

Más tarde, en junio de 1965, Tiller y Shirato (13) presentan un estudio teórico basado en la misma teoría: de definir la permeabilidad en función de la velocidad de penetración del agua en la probeta. El planteamiento matemático lo hacen de una manera muy análoga al de un trabajo publicado por Ruth (14) en el año 1933.

En esta misma línea de investigación, Murata (15) en diciembre de 1965 dió a conocer los resultados experimentales que había obtenido sobre tres tipos de probetas cilíndricas de 20 centímetros de diámetro y 20 cm de altura. El artículo, incluye la aplicación de la ecuación de Darcy al caso de un flujo de agua a través de la masa de hormigón y el análisis del coeficiente de difusión, obtenido experimentalmente, en la expresión general de la difusión.

Finalmente, hay que citar el trabajo publicado por Bonzel (15) en septiembre de 1966 en el que estudia también la per-

meabilidad en función de la velocidad y profundidad de penetración del agua en el hormigón. Los ensayos los efectuó durante los años 1961 a 1965 y examinó la influencia que el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la edad y el sistema de conservación tenía sobre la permeabilidad al agua. Empleó once clases distintas de cemento y varió la relación agua/cemento entre 0,45 y 0,80. Las probetas tenían forma prismática y de dimensiones 20 x 20 x 12 cm; la conservación se hizo de dos maneras diferentes: sumergidas en agua y al ambiente del laboratorio.

Sobre la influencia de la forma de conservación de las probetas Weigler (17) en el año 1963, publicó un trabajo muy interesante sobre los ensayos que realizó con numerosas series de probetas de hormigón mantenidas en ambientes distintos, llegando a la conclusión de que el modo de conservación influye de manera decisiva en los resultados de los ensayos.

Algunos investigadores han estudiado el problema de la permeabilidad del hormigón sometiendo una de las caras de la probeta a la acción del vapor de agua. Una de las aportaciones más completas en este aspecto se debe a Wierig (18) reflejada en dos artículos publicados en los años 1963 y 1965. En el primero describe el dispositivo de ensayo y establece una expresión matemática para deducir el coeficiente de transmisión del vapor de agua en el interior del hormigón. También, hace un estudio de la influencia que tiene, en la permeabilidad, la relación agua/cemento, la edad del hormigón y el espesor de las probetas; llegando a la conclusión de que para pequeños espesores de hormigón el fenómeno de la carbonatación juega un papel importante en la permeabilidad.

En el segundo de los trabajos, el autor, hace una amplia exposición de la labor experimental que ha realizado y de las conclusiones que se deducen de los resultados obtenidos. Entre los factores más influyentes en la permeabilidad al vapor de agua de un hormigón, de alta compacidad, cita el de la relación agua/cemento: un aumento en dicha relación, de 0,4 a 0,8 supone un aumento del doble en la permeabilidad. Otro de los factores es la temperatura; si se hace subir la temperatura de 20 a 50°C, en la cara de la probeta sometida a presión, la permeabilidad resulta cuatro veces mayor. También analiza otros factores, como: las dimensiones de las probetas, tratamiento hidrotérmico del hormigón, curado, conservación, etc.

Del análisis efectuado con la bibliografía consultada se deducen las siguientes conclusiones:

- La literatura solo aporta datos fraccionados y poco definidos en los que se refiere a la tecnología del hormigón en relación con su permeabilidad a los gases.
- No se ha encontrado ninguna relación satisfactoria que ligue la permeabilidad al agua y a los gases que ofrece el hormigón.
- La mayor proporción de cemento en la dosificación mejora la impermeabilidad. Este aumento es muy sensible en cantidades pequeñas de cemento, de 200 a 300 kg por metro cúbico de hormigón; y resulta apenas apreciable después de los 400 kg.
- Para obtener un hormigón relativamente impermeable es conveniente que la relación agua/cemento no sea superior a 0,55.

- En la permeabilidad tiene un factor decisivo el tratamiento hidrotérmico efectuado durante el curado; la edad y la conservación.
- No influye en la permeabilidad del hormigón el empleo en su fabricación de puzolanas, escorias, cenizas volantes ni la adición de aireantes.
- En los trabajos experimentales se ha de eliminar el efecto de borde; por lo que debe hacerse un sellado de la superficie lateral de las probetas que sea capaz de garantizar la suficiente estanquidad para que no altere los resultados.

Los dos únicos autores que incluyen valores concretos de la permeabilidad al aire del hormigón deducidos de los ensayos, son Walz (1) y Huart (4). Estos valores, resumidos y expresados en las mismas dimensiones son:

Resultados obtenidos por Walz.

Forma y dimensiones de las probetas: cilíndricas de 22 cm de diámetro y 12 cm de altura.

Modo de conservación: 7 días, bajo una arpillera húmeda y con una temperatura de 7 a 22°C. Después a la temperatura de laboratorio y con una humedad del orden del 60%.

Caudales: expresados en l/h y m² de superficie, a 20°C y 760 milímetros Hg.

CAUDALES DE AIRE MEDIDOS

Dosificación: 240 kg de cemento por m³ de hormigón

Presión kp/cm ² \ a/c	CONSISTENCIA BLANDA			CONSISTENCIA FLUIDA		
	0,58	0,77	1,11	0,74	0,82	1,03
0,1	0,1	1	133	1	0	6
0,5	0,2	34	765	23	7	103
1,0	4,0	76	1.945	61	15	280
2,0	15,0	169	4.551	143	38	649
5,0	65,0	728	15.695	---	--	---

Dosificación: 300 kg de cemento por m³ de hormigón

Presión kp/cm ² \ a/c	CONSISTENCIA BLANDA			CONSISTENCIA FLUIDA		
	0,52	0,74	0,81	0,65	0,70	0,89
0,1	0	0	12	0	0	13
0,5	0	0	94	3	0	86
1,0	0	0	217	6	0	189
2,0	0	0	252	20	0	429
5,0	0	0	---	0	65	---

Dosificación: 350 kg de cemento por m³ de hormigón

Presión kp/cm ² \ a/c	CONSISTENCIA BLANDA			CONSISTENCIA FLUIDA		
	0,50	0,53	0,68	0,54	0,60	0,73
0,1	0	0	0	0	0	0
0,5	0	0	0	0	0,3	0
1,0	0	0	0	1	1,0	1
2,0	0	0	0	5	4,0	--
5,0	0	0	152	13	17,0	24

Resultados obtenidos por Huart.

Forma y dimensiones de las probetas: cilíndricas de 20 cm de diámetro y 8 cm de altura.

Modo de conservación: las probetas al año de fabricadas se secaron en estufa a 50°C hasta peso constante y se ensayaron.

Caudales: expresados en l/h y m² de superficie, a 20°C y 760 milímetros de Hg.

CAUDALES DE AIRE MEDIDOS

Dosificación: kg de cemento por m³ de hormigón.

Presión kp/cm ² \ a/c	200	300	400	600
	0,75	0,57	0,48	0,37
0,3	17	6	1	0,9
1,0	85	28	4	3,3
2,0	254	85	17	9,0

El análisis de estos resultados comprueban las conclusiones citadas anteriormente pero no aportan ninguna información - práctica ya que son muy dispares.

III.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

III.1.- Generalidades.

La permeabilidad es una propiedad de los medios porosos por la que permiten que un fluido pueda atravesarlo, al penetrar por sus poros, como consecuencia de que exista una diferencia de presión entre las superficies de entrada y salida del - fluido en el medio poroso.

Por lo tanto, la permeabilidad, dependerá, de una parte, de las propiedades físico-químicas del medio y, de otra parte, de las características del fluido.

Al referirse este trabajo al paso del aire a través del hormi_gón resulta conveniente mencionar, aunque sea brevemente, - aquellas características de la estructura del hormigón y de las propiedades del aire que influyen, principalmente, en la permeabilidad.

III.2.- Estructura del hormigón.

El hormigón es un aglomerado heterogéneo compuesto, fundamen_talmente, de cemento, aire, agua y áridos; y si se trata de un hormigón armado, armaduras.

Las cualidades del hormigón que más directamente condicionan su permeabilidad son: la compacidad, la constancia de volumen y la cohesión.

Estas tres cualidades dependerán de las características de los materiales; de la proporción en que intervengan -dosificación- y de la preparación y fabricación del hormigón.

De cada una de estas variables se incluye un análisis en el que se señalan aquellas propiedades que afectan más directamente a la permeabilidad del hormigón.

III.2.1.- Características de los materiales.

Cemento.

Al ser el cemento un conglomerante, su acción será más eficaz cuanto mayor sea la superficie de contacto que ofrezca al agua de amasado; ya que así se consigue una hidratación más completa y en menos tiempo. Esta mayor superficie de contacto será proporcional a la finura de los granos de cemento.

El aumento de la finura incrementa la velocidad de hidratación del cemento y produce mayor resistencia inicial, más rápida generación de calor y mejora la impermeabilidad; pero, a su vez, precisa más cantidad de agua para conseguir una ductilidad adecuada y ésto supone una disminución de la compacidad.

Los granos cuyo tamaño está comprendido entre 25 y 10 micras dan una buena resistencia mecánica; los de tamaño inferior a 10 micras confieren al hormigón, además de resistencia mecánica, cualidades de impermeabilidad (19). El límite inferior

de la superficie específica "Blaine" para obtener un hormi -
gón de buena calidad es de 3.200 a 3.400 cm²/gramo (20); el
referirse a la superficie específica es debida al tamaño ex -
tremadamente pequeño que presentan las partículas de cemento
y representa el área total en centímetros cuadrados de la su
perficie de todas las partículas, supuestas esféricas, que -
tiene un gramo de cemento.

Dicha superficie específica se obtiene, aproximadamente, me -
diante un tamiz de 4.900 mallas por cm², que da un tamaño má
ximo de 88 micras. Generalmente el tamiz cuya apertura de ma
lla es de 20 micras retiene el 50 ± 5% de las partículas de
cemento. Es decir que el diámetro teórico medio de las partí
culas se puede suponer que es del orden de 20 micras.

Aire.

El aire, cuando se incorpora al hormigón intencionadamente,
alcanza la categoría de un componente más, como lo es el agua
y los áridos. Las burbujas de aire ocluido incrementan la do
cilidad del hormigón resultando, como consecuencia, con ma
yor compacidad al facilitar el relleno, con pasta, de los -
huecos que quedan entre los áridos.

El diámetro de las burbujas está comprendido, según Walz (21)
entre 0,05 y 0,30 mm y el volumen total ocupado representa,
generalmente, del 4 al 5% del volumen total aparente del hor
migón. Siendo conveniente no superar el 6% para evitar que -
influya desfavorablemente en la retracción, expansión térmi
ca o en la permeabilidad, de acuerdo con las conclusiones a
que llegó Klieger (22) en un estudio que hizo muy completo -
sobre la estructura del hormigón.

Agua.

El agua que ha de emplearse en la fabricación del hormigón - (23) no debe ser de carácter ácido ya que la pasta de cemento hidratada es básica (el valor de pH debe ser superior a 5) no debe incluir hidratos de carbono, que impedirían el fraguado; y el contenido de sulfatos tampoco conviene que sea superior a un gramo por litro, por el peligro que supone el que se formara sulfoaluminato cálcico expansivo. Finalmente, el ión cloro debe quedar limitado a seis gramos por litro, - principalmente si se trata de un hormigón armado, y el agua debe estar limpia (sustancias disueltas, inferior a 15 gramos por litro).

Por otra parte habrá que tener en cuenta que el tamaño de la molécula de agua es del orden de 1.915 \AA (24); así como los valores, que en función de la temperatura, se señalan a continuación.

PROPIEDADES FISICAS DEL AGUA

Temperatura, °C	Peso específico γ , kg/m ³	Densidad ρ , kg-seg ² /m ⁴	Viscosidad $\mu \times 10^4$, kg-seg/m ²	Viscosidad cinemática $\nu \times 10^6$, m ² /seg	Tensión superficial $\sigma \times 10^2$, kg/m	Presión del vapor P_v , kg/cm ²	Módulo de elasticidad volumétrico K, kg/cm ²
0,0	1.000	101,94	1,83	1,79	0,7709	0,0056	20.320
4,4	1.000	101,94	1,58	1,55	0,7649	0,0077	20.812
10,0	1.000	101,94	1,34	1,31	0,7560	0,0119	21.445
15,6	1.000	101,94	1,14	1,12	0,7486	0,0183	21.937
21,1	999	101,83	0,996	0,975	0,7396	0,0253	22.429
26,7	995	101,43	0,879	0,864	0,7322	0,0358	22.851
32,2	994	101,33	0,776	0,765	0,7233	0,0492	23.132
37,8	993	101,22	0,693	0,684	0,7128	0,0675	23.273
49,0	987	100,61	0,571	0,567	0,6935	0,1195	23.413
66,0	980	99,90	0,442	0,442	0,6637	0,2601	23.062
82,0	970	98,88	0,354	0,358	0,6340	0,5273	22.359
100,0	958	97,66	0,290	0,296	0,5997	1,0335	21.304

Aridos.

Los áridos son los materiales que trabados entre sí mediante la pasta de cemento forman el hormigón. La naturaleza de los mismos debe ser tal que su propia resistencia sea igual o superior a la que se vaya a exigir al hormigón, que no perturban desfavorablemente el proceso de fraguado de la pasta de cemento y que garanticen una buena adherencia y comportamiento a lo largo del tiempo.

Según su procedencia se distinguen los áridos naturales y - los áridos artificiales; entendiéndose por éstos aquellos que resultan de un proceso industrial.

En la compacidad de un hormigón juega un papel fundamental - el tamaño y la forma del árido. En función del tamaño los - áridos se clasifican en "árido fino", que ha de pasar por un tamiz de malla 5 mm; y en "árido grueso", que ha de quedar - retenido en un tamiz de luz de malla 5 mm. El coeficiente de forma del árido grueso no debe ser inferior a 0,15; se en - tiende por coeficiente de forma α , el obtenido a partir de un número n de granos por la expresión:

$$\alpha = \frac{\sum V_i}{\frac{n}{6} \sum d_i^2}$$

siendo V_i el volumen del grano y d_i la mayor dimensión, de - cada grano, que queda definida por la distancia entre dos - planos paralelos tangentes al grano.

Entre los áridos de mayor tamaño se alojan luego los de tama - ños inferiores, hasta llegar a las fracciones más finas, como

relleno de huecos. Existen procedimientos muy sencillos para determinar la granulometría de los áridos que permiten obtener un hormigón bien compactado con los distintos tamaños de árido que se vayan a emplear.

En los áridos la porosidad es muy variable. En relación con el diámetro de los poros se distinguen los microporos y los poros; los primeros son aquellos cuyo diámetro es inferior a las cuatro micras y que, dado su pequeño diámetro no permiten la entrada del agua. Los poros de diámetro superior a cuatro micras permiten, generalmente, la entrada del agua y que sean ocupados por la pasta de cemento.

No se tiene, todavía, un conocimiento suficiente sobre la distribución y tamaño de los poros que presentan los áridos, pero Blanks (25) en el año 1949 publicó un trabajo sobre la estructura de los mismos, en el que señaló que la posibilidad de su drenaje es función de la naturaleza del árido y de la forma y tamaño de sus poros. El agua en los poros capilares de los áridos corrientes, que quedan comprendidos entre 5 y 6 micras, se puede evaporar casi completamente en un ambiente cuya humedad relativa sea inferior al 40%.

Armaduras.

Para el estudio de la permeabilidad al aire del hormigón las armaduras metálicas, que se colocan en la masa del mismo, constituyendo el hormigón armado, se pueden considerar como otro árido más; pero con la particularidad de que su porosidad es cero.

El empleo de armaduras facilita sensiblemente el paso del

aire a través del hormigón. En hormigones de igual dosificación, en masa y armado, los valores de la permeabilidad, obtenidos experimentalmente, están en la relación de uno a dos, aproximadamente, (26).

III.2.2.- Dosificación y fabricación del hormigón.

Señaladas las características de los materiales que corrientemente componen el hormigón y están íntimamente relacionados con la porosidad; se indican, a continuación, los factores que en el estudio de la dosificación y posterior fabricación del hormigón influyen sensiblemente en su permeabilidad.

Dosificación del hormigón

El estudio del tipo de dosificación que se debe emplear en la fabricación de un hormigón ha de ir orientado a conseguir que éste presente una resistencia y durabilidad suficiente; siendo ambas propiedades las que definen, básicamente, la calidad de un hormigón.

La determinación de la resistencia no ofrece ninguna dificultad; ya que en la designación del cemento debe figurar la "resistencia normal", que es la que han de alcanzar, en los ensayos, las probetas confeccionadas en unas ciertas condiciones con ese cemento; y, por otra parte, los áridos presentan, generalmente, una resistencia muy superior a la que se va a exigir al hormigón. Finalmente, el cálculo analítico proporciona una serie de fórmulas sencillas, muy conocidas por los especialistas en el cálculo de resistencia

del hormigón, que facilita las proporciones y forma en que -
deben mezclarse los distintos componentes: cemento, agua y -
áridos; entre ellas la de Bolomey (27), que da la resisten-
cia del hormigón a compresión a los 28 días, en función de -
la cantidad de cemento y de la relación, agua/cemento.

La durabilidad de un hormigón cuya dosificación ha sido co-
rrectamente estudiada; fabricado con materiales idóneos, -
bien conservados, y siguiendo las normas de buena práctica -
dependerá, fundamentalmente de su compacidad; o dicho de -
otra manera, de su porosidad. El mayor grado de compacidad se
consigue mediante el empleo de una buena composición granulo-
métrica de los áridos y una adecuada relación entre las can-
tidades de agua y de cemento.

Teóricamente se podría llegar a obtener un hormigón de poro-
sidad cero; pero como existen unas ciertas limitaciones al -
tener que cumplir otras condiciones, relacionadas con la do-
cilidad, reología, elasticidad, etc., la porosidad en hormi-
gones corrientes queda comprendida entre el 8 y el 25%.

Fabricación del hormigón.

Para la fabricación correcta de un hormigón se debe tener en
cuenta que todos los áridos deben quedar no sólamente envuel-
tos por la pasta de cemento; si no que, además, deben adherir-
se a ella.

Un hormigón, cuya masa sea muy compacta, por no quedar prác-
ticamente huecos, no podrá considerarse que está bien fabri-
cado si las superficies de contacto de los áridos no tiene -
interpuesta una lámina de pasta -cemento más agua- de manera

continua. Es decir, su compacidad, cohesión y resistencia a compresión podrán parecer aceptables pero presentará siem - pre una resistencia a la tracción y flexión insuficientes y, principalmente, ofrecerá una gran permeabilidad por los conductos capilares creados entre las superficies de los ári- dos.

Un simple recubrimiento de los áridos por una lámina contí- nua de pasta, pero sin adherencia íntima con el aglomerante, permitirá, igualmente, el paso libre de los conductos capilares, ya que dicha lámina no quedará nunca completamente ce- rrada, si bien la permeabilidad disminuirá notablemente.

Actualmente para conseguir una mejor compactación de la masa de hormigón se recurre al asentamiento de su masa por vibración. La vibración consiste en someter al hormigón a una - serie de sacudidas de una frecuencia elevada, variando de - 3.000 vibraciones por minuto hasta más de 22.000 vibracio- nes por minuto. El tiempo que se mantiene la vibración de - pende de la dosificación y tamaño del árido; y, también, para un mismo tipo de hormigón cuanto mayor es la frecuencia menor tiempo es necesario mantener la vibración - como dura- ción máxima de la vibración suele tomarse la de dos minutos.

La vibración permite obtener hormigones más uniformes y de mayor densidad, lo que supone una mejor calidad y un menor volumen de sus huecos. La densidad aparente de un hormigón colocado en obra sin ninguna clase de asentamiento, suele - dar un valor de $2,20 \text{ kg/dm}^3$ y mediante un vibrado enérgico se consigue una densidad del orden de $2,40 \text{ kg/dm}^3$ lo que supone un aumento de la misma de casi un 10%, que influye sen

siblemente en favor de su impermeabilidad.

De todo lo indicado se deduce que para fabricar un hormigón resistente y lo menos permeable posible conviene que:

- los áridos sean hidrófilos,
- sean mojados por el agua; bien directamente, bien por la pasta de cemento. Esta condición de mojado en las interfaces necesita un mínimo de agua, independientemente de aquella que precisa para la hidratación del cemento,
- la relación de adherencia entre el conglomerante y los áridos debe ser una relación de afinidad. La acción química de contacto de los componentes sólo se manifiesta si los cuerpos están en solución por permitir, de este modo, su contacto real en una extensión suficiente y los desplazamientos corpusculares necesarios para este fin,
- el tamaño de los áridos no debe ser inferior a 200 micras; mientras que los granos de cemento no deben sobrepasar las 80 micras,
- la granulometría sea lo más continua posible con el fin de que queden los menos huecos posibles,
- la cantidad de cemento debe limitarse para evitar una retracción excesiva,
- la cantidad de agua de amasado debe ser mínima, pero compatible con la trabajabilidad,
- debe preverse el vibrado de la masa; con una frecuencia y duración que será función del tipo de dosificación.

III.2.3.- Porosidad del hormigón.

El hormigón es un material eminentemente heterogeneo. Durante su fabricación y fraguado existen las tres fases: sólida, líquida y gaseosa; y sus características de compacidad, docilidad, resistencia, etc., están íntimamente ligadas entre sí. El estudio cuidadoso del tipo de dosificación y el cumpli-miento de las condiciones para su fabricación, señaladas anteriormente, no implica que se pueda conseguir un hormigón - sin poros.

Los poros que existen en el hormigón pueden proceder de:

- la estructura interna de los granos de cemento,
- el aire que intencionadamente pueda incorporarse a la masa de hormigón,
- la estructura interna de los áridos,
- el asentamiento, al producirse por no quedar completamente rellenos los huecos que se forman entre los áridos,
- capilares, originados, fundamentalmente, por las interfa-ses entre los distintos componentes,
- el gel, como consecuencia de las transformaciones químicas que se manifiestan durante el fraguado,
- la evaporación de aquella agua de amasado que se ha empleado en la fabricación del hormigón y que no toma parte en - la hidratación del conglomerante.

Los poros que presenta la estructura interna del cemento puede despreciarse pues, por su pequeño tamaño, no intervienen sensiblemente en el fenómeno de la permeabilidad.

El aire intencionadamente incorporado a la masa de hormigón tiene como misión dotar a éste de unas características especiales de docilidad, ligereza, etc.; y, según Klieger (28) - cuando las burbujas de aire no sobrepasan el 6% del volumen aparente del hormigón apenas tienen influencia en la permeabilidad. No obstante, cuando se incorpora aire a la masa de hormigón es con el fin de obtener un tipo de hormigón especial; por lo que no queda incluido en los límites de este trabajo que se refiere, fundamentalmente, a hormigones corrientes.

La porosidad de los áridos es muy variable. En hormigones corrientes el tipo de árido más frecuentemente empleado es el silíceo. De una serie de seis muestras ensayadas con la clase de árido que se ha empleado para la realización de las probetas destinadas a la parte experimental del presente estudio, los valores obtenidos han oscilado entre el 0,9% y el 1,3% y el valor medio de la porosidad deducido ha sido el de 1,08%.

En un hormigón bien compactado la porosidad representa el 12% aproximadamente, de su volumen aparente (29). Este valor es prácticamente constante; hasta el punto de que cuando un hormigón presenta una porosidad superior al 13,5% se considera como de baja calidad. El 1% de la porosidad corresponde a los poros originados por el asentamiento de la masa de hormigón.

Para obtener un hormigón de buena calidad es necesario que la mezcla presente unas condiciones de trabajabilidad aceptables y ésto se consigue empleando una cierta cantidad de agua muy superior a la que precisa el cemento para hidratar

o cerrados. Los cerrados están constituidos por las burbujas de aire que quedan fijas en la masa del hormigón, al realizarse la mezcla de los áridos con el agua y el cemento y no intervienen en el fenómeno de la permeabilidad. En los poros abiertos se pueden distinguir los que son pasantes y los que no lo son; éstos últimos son poros sin salida y que, como los cerrados, tampoco influyen en la permeabilidad, al no establecerse en su interior ninguna circulación del fluido.

Establecida esta clasificación de los tipos de poros, solamente aquellos que pueden identificarse como poros pasantes son los que permiten el paso de un fluido a través de la masa del hormigón y el conjunto de ellos se define como la "porosidad eficaz del hormigón".

El diámetro de los poros fué analizado por G.H. Verbeck (31), quien dedujo los siguientes valores:

- poros de gel: $2,5 \cdot 10^{-8}$ cm
- poros capilares: 10^{-3} a 10^{-4} cm
- poros de asentamiento: muy variable, pudiendo superar el valor 10^{-1} cm.

Con un microscopio óptico no se alcanza a los poros cuyo diámetro es inferior a 10^{-7} cm, salvo en casos muy especiales, por lo que la suma y distribución de los poros de gel no puede ser determinada. Tampoco el microscopio electrónico resuelve esta dificultad, ya que solo admite la observación de muestras muy pequeñas. Sin embargo la porosidad debida a estos poros influye sensiblemente en las características de un hormigón. Un aumento en la porosidad de la pasta de cemento en el 1% significa una disminución en su resistencia mecánica del 2,2%.

Por otra parte la masa del hormigón, por su composición y sistema de fabricación, desde el punto de vista macroscópico, resulta isótropa como lo demuestra la uniformidad de los resultados experimentales que sobre la resistencia, absorción de agua, transmisión de calor, etc. se obtienen con hormigones de igual composición; fabricados y conservados en las mismas condiciones. Esto es, que se obtienen los mismos resultados sobre probetas cúbicas cuando se efectúan los ensayos sobre dos superficies opuestas cualesquiera de la misma.

En el estudio de la permeabilidad del hormigón, por su isotropía, no se puede aplicar ninguno de los modelos analógicos que se han adoptado para otros medios porosos y que se fundan en suponer que la porosidad del medio es equivalente a un haz de capilares de dirección paralela al flujo. Un modelo más real debería permitir una interconexión completa entre los capilares, en todas direcciones; tener en cuenta que el trazado de dichos capilares es curvilíneo sobre una superficie alabeada; y que su longitud es superior al espesor de la probeta, lo que implicaría un modelo demasiado complejo para que resultara útil.

III.3.- Características del aire.

Lo mismo que para el hormigón, a continuación se señalan aquellas características del aire atmosférico que más están relacionadas con el problema de la permeabilidad de un medio poroso.

El aire, como todos los fluidos, está compuesto de moléculas discretamente espaciadas y en movimiento continuo.

Los fluidos se deforman continuamente bajo esfuerzos tangenciales. La rapidez de esta deformación angular dependerá de la magnitud del esfuerzo. Si la rapidez de deformación es directamente proporcional al esfuerzo tangencial, el fluido, - se llama newtoniano, partiendo de una deformación cero para un esfuerzo cero. En estos casos la constante de proporcionalidad se define como η , viscosidad dinámica. El aire y el agua son fluidos newtonianos.

La forma y detalles de la estructura de la molécula de un fluido dependen, evidentemente, de la naturaleza química de dicho fluido. En el caso del aire los componentes más importantes son el nitrógeno y el oxígeno.

Un volumen de un fluido puede estar en equilibrio en dos casos, cuando está en un estado de reposo o cuando se está moviendo como un cuerpo sólido. El equilibrio es el resultado del campo de fuerzas en el que está colocado el fluido y las fuerzas restrictivas ejercidas sobre las fronteras del volumen de éste. Dicho equilibrio dependerá de las propiedades primarias del fluido: presión, volumen, temperatura y masa. Para el aire, en el campo limitado de presiones y temperaturas que interesan en el estudio de la permeabilidad del hormigón; es válido suponer que la función de estado que las relaciona cumple, sensiblemente, las condiciones de los gases ideales.

Independientemente de las relaciones a las que habrá que hacer referencia más adelante, conviene indicar a continuación aquellas características del aire que, según los párrafos anteriores, se deben tener en cuenta al analizar el paso del aire a través del hormigón.

COMPOSICION DEL AIRE ATMOSFERICO

Elementos	Análisis ponderal %	Análisis volumétrico %	Peso atómico	Peso del litro pondios	Solubilidad en el agua
Nitrógeno	76,85	‡ gases re-ales = 79	14,008	1,25	-
Oxígeno	23,14	21	16,-	1,42892	3,4 l en 10 l de agua
Gases raros	0,001	--	--	--	--

CARACTERISTICAS TERMICAS DEL AIRE EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

TEMPERATURA		Densidad	Conductividad	Viscosidad	Viscosidad
$^{\circ}\text{K}$	$^{\circ}\text{C}$	ρ kg/m^3	térmica $\text{kcal. m. m}^{-2} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ h}^{-1}$	dinámica kg. seg. m^{-2}	cinemática $\text{m}^2 \text{ . seg}^{-2}$
273	0	1,293	0,0209	$1.75 \cdot 10^{-6}$	$13,3 \cdot 10^{-6}$
283	10	1,246	0,0215	$1.80 \cdot 10^{-6}$	$14,2 \cdot 10^{-6}$
293	20	1,203	0,0221	$1.85 \cdot 10^{-6}$	$15,1 \cdot 10^{-6}$
303	30	1,163	0,0227	$1.90 \cdot 10^{-6}$	$16,0 \cdot 10^{-6}$
313	40	1,133	0,0233	$1.95 \cdot 10^{-6}$	$16,9 \cdot 10^{-6}$
323	50	1,060	0,0239	$2.00 \cdot 10^{-6}$	$17,9 \cdot 10^{-6}$

IV.- TRABAJO EXPERIMENTAL

El objeto del trabajo experimental ha sido el de determinar - la permeabilidad al aire del hormigón en función de su dosificación, condiciones de secado y espesor.

Los valores de la permeabilidad se han obtenido midiendo los caudales de aire que pasan a través de probetas cilíndricas - de hormigón, al establecer entre sus bases, una diferencia de presión.

En este trabajo experimental se distinguen, fundamentalmente, las siguientes partes:

- descripción del permeabilímetro,
- fabricación de las probetas de hormigón,
- puesta a punto y ensayos previos,
- ensayos sistemáticos y resultados obtenidos,
- análisis de los resultados obtenidos.

IV.1.- Descripción del permeabilímetro.

El permeabilímetro ha sido especialmente diseñado para estos ensayos, su esquema se representa en la figura 1 y comprende:

- un dispositivo para el suministro de aire a presión,
- un dispositivo para la colocación de la probeta a ensayar,
- un dispositivo para la medida de los caudales de aire - filtrados a través de la probeta.

En la figura 2, se presenta un fotograma que recoge los distintos elementos.

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

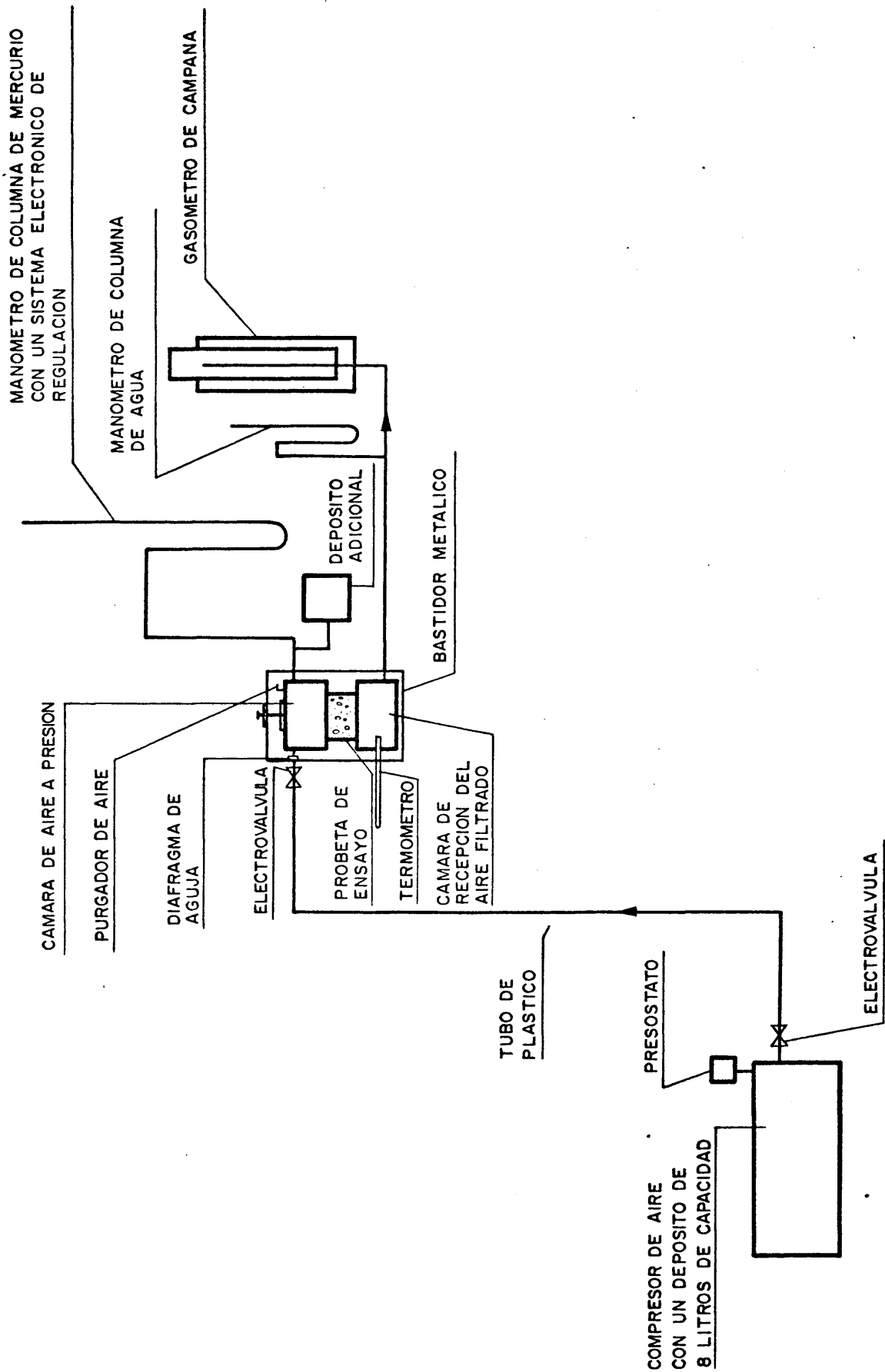


FIG. 1

ESQUEMA DEL PERMEABILIMETRO DISEÑADO PARA LA REALIZACION DE LOS ENSAYOS

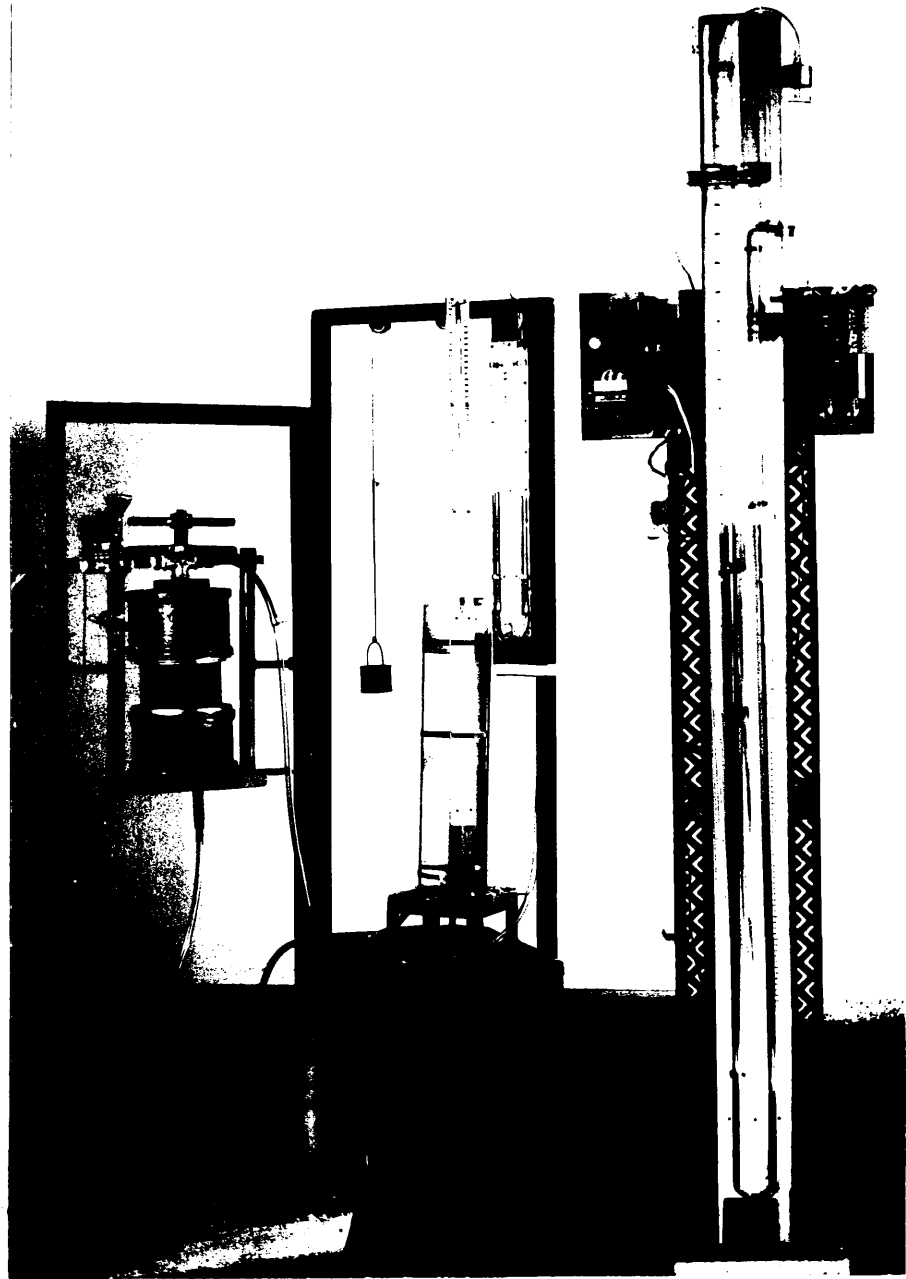


Figura 2

Vista de las tres partes fundamentales del banco de ensayos: La probeta en el dispositivo de puesta a presión; la campana para la medida de caudales de aire filtrado; y el presostato de mercurio, accionado por dos fotocélulas.

a) Dispositivo para el suministro de aire a presión.

El aire a presión es suministrado mediante un compresor, capaz de alcanzar una presión de 10 kp/cm^2 , que toma el aire del ambiente del laboratorio, cuya temperatura es de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ y humedad relativa $50 \pm 5\%$.

El compresor dispone de un depósito de aire a presión de unos ocho litros de capacidad y la presión en el mismo se regula por medio de un presostato "Billman" con reglaje de $0,2$ a $5,5 \text{ kp/cm}^2$ y un diferencial, también regulable, de $0,03$ a $0,20 \text{ kp/cm}^2$. A la salida del compresor hay una electro-válvula "Danffoss" que tiene conectado un tubo de plástico flexible, transparente, de ocho milímetros de diámetro interior y dos milímetros de espesor. El tubo, al ser transparente, permitiría observar si se produjera alguna eventual condensación del aire.

El otro extremo del tubo de plástico queda conectado a una segunda electroválvula de iguales características que la anterior, colocada a la entrada de la cámara de aire a presión del permeabilímetro y que se ha instalado de modo que ambas válvulas funcionan simultáneamente.

Con el fin de evitar la inercia del aire, en dicha cámara del permeabilímetro, ya que las electroválvulas empleadas son de paso todo o nada, se ha puesto, después de la segunda electroválvula, un diafragma de aguja que deja pasar el flujo de aire lentamente; y, además, se ha aumentado su capacidad mediante un depósito de unos cuatro litros.

La cámara de aire a presión del permeabilímetro es un cilindro metálico, tapado por su parte superior, de 16 cm de

diámetro interior y 10 cm de altura, lo que supone una capacidad de unos dos litros. Está provista de un purgador - de aire y queda conectada, a través de un tubo de plástico, a un manómetro en U de mercurio.

El manómetro regula la presión del aire en la cámara mediante un sistema electrónico que pone en movimiento la señal de dos fotocélulas; para la presión máxima y mínima, respectivamente. Esto es, al subir la columna de mercurio, como consecuencia de la entrada de aire suministrado por el compresor, interrumpe un circuito cerrado por la fotocélula superior y cierra las electroválvulas y, por consiguiente, la entrada del aire. Al disminuir la presión en la cámara, por ir pasando el aire a través de la probeta, la columna de mercurio desciende y establece de nuevo el circuito, mediante la fotocélula inferior abriendo las electroválvulas. Con el fin de permitir el funcionamiento mecánico de las electroválvulas se ha dejado un intervalo de 12 milímetros entre el cierre y apertura del circuito.

Las células fotoeléctricas van montadas sobre un cursor - que desliza por una de las varillas del manómetro de vidrio en U y mediante un tornillo de fijación, el cursor, se coloca en la posición correspondiente a la presión que se vaya a efectuar la experiencia. Con este sistema se consigue la misma precisión en toda la escala.

b) Dispositivo para la colocación de la probeta a ensayar.

La cámara de aire a presión se cierra por su parte inferior mediante una arandela metálica plana de 10 mm de espesor y de 16,5 cm de diámetro exterior y 9 cm de diámetro -

interior; a la que se adosa la probeta de hormigón para la experiencia. La estanquidad se consigue interponiendo dos juntas tóricas entre la arandela y la cámara, la primera, y entre la arandela y la probeta, la segunda.

El ajuste de la probeta, por su superficie opuesta; esto es, a la cámara de recepción del aire filtrado, se realiza de manera similar a la anterior.

Una vez montada la probeta se coloca el conjunto, -cámara y probeta- en un bastidor metálico cerrando todas las juntas a presión por medio de un tornillo de apriete.

- c) Dispositivo para la medida de los caudales de aire que pasan a través de la probeta.

El aire filtrado a través de la probeta se recoge en la cámara de recepción, ya mencionada, de igual forma y di-mensiones que la cámara de aire a presión, y que se conecta por medio de un tubo de plástico a un gasómetro de campana. Los caudales de aire se van obteniendo midiendo los incrementos de volumen de la campana, al ir manteniendo el sistema a la presión atmosférica; que se comprueba, a su vez, con un manómetro en U de columna de agua. La camara lleva incorporado un termómetro de mercurio que aprecía la décima de grado.

Con el fin de conseguir una mayor precisión en las medi-das, a dicho gasómetro, se le pueden acoplar dos campanas de 800 cm^3 y 4.000 cm^3 de capacidades máximas, respetivamente, usándose una u otra en función del caudal de fluido a medir.

IV.2.- Fabricación de las probetas de hormigón.

Al estudiar los tipos de dosificación del hormigón que debían prepararse para los ensayos se han considerado las conclusiones recogidas en el Apartado II, deducidas de la bibliografía consultada; así como, el análisis que sobre las características de los componentes del hormigón, su fabricación y conservación, se ha desarrollado en el Apartado III.

Estas consideraciones han sido las que han hecho juzgar como más conveniente estudiar cuatro relaciones de agua/cemento: 0,37; 0,42; 0,47 y 0,52, y con cada una de ellas, dos tipos de granulometría, fina y gruesa.

La granulometría fina se ha estudiado de modo que se obtuviera una curva granulométrica que se aproximara a la de Fuller. La granulometría gruesa se ha planteado con una gran proporción de árido grueso y poca arena con el fin de que la estructura de los dos tipos de hormigones -granulometría fina y gruesa- resultaran claramente diferenciados.

A continuación se incluye un cuadro con el detalle de las dosificaciones y su designación, así como las curvas granulométricas.

Composición del hormigón m ³	DOSIFICACION							
	Granulometría fina				Granulometría gruesa			
	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8
Relación a/o	0,37	0,42	0,47	0,52	0,37	0,42	0,47	0,52
Gravilla	372 kg	372 kg	372 kg	372 kg	900 kg	900 kg	900 kg	900 kg
Carboncillo	842 "	842 "	842 "	842 "	590 "	590 "	590 "	590 "
Arena	628 "	628 "	628 "	628 "	355 "	355 "	355 "	355 "
Cemento P-350	434 "	382 "	340 "	307 "	434 "	382 "	340 "	307 "
Agua	160 l	160 l	160 l	160 l	160 l	160 l	160 l	160 l

El hormigón ha sido vibrado con aguja a 9.000 v.p.m. y las consistencias de las masas respectivas de cada dosificación, medidas en el "cono de Abrams" han sido:

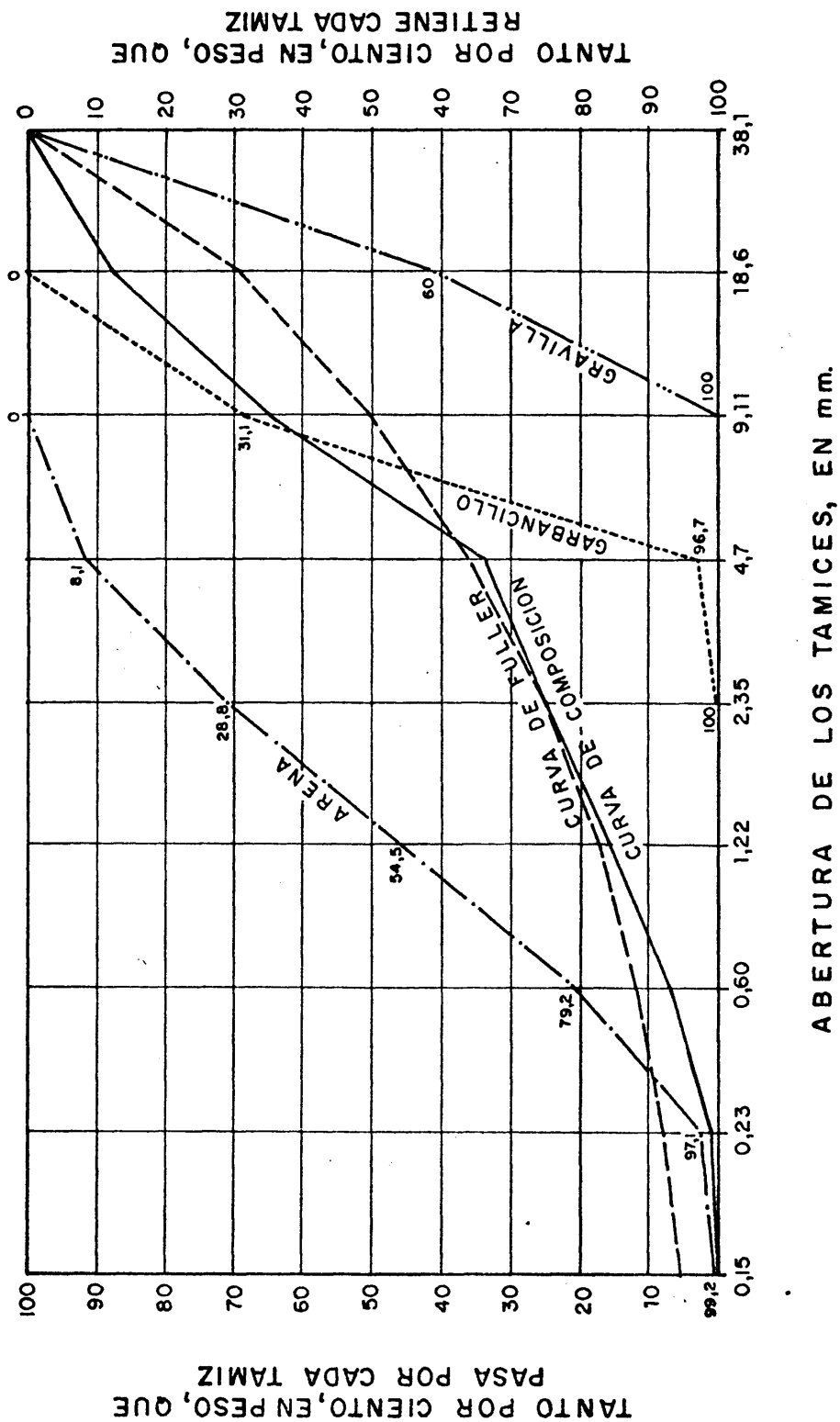
Dosificación	1	2	3	4	5	6	7	8
Consistencia mm	10	12	16	19	--	10	12	15

que supone una buena docilidad media del hormigón y permite - garantizar una trabajabilidad correcta del mismo.

La resistencia a compresión del hormigón ha sido de 340 a - 360 kp/cm² el de granulometría fina y de 320 a 350 kp/cm² el de granulometría gruesa.

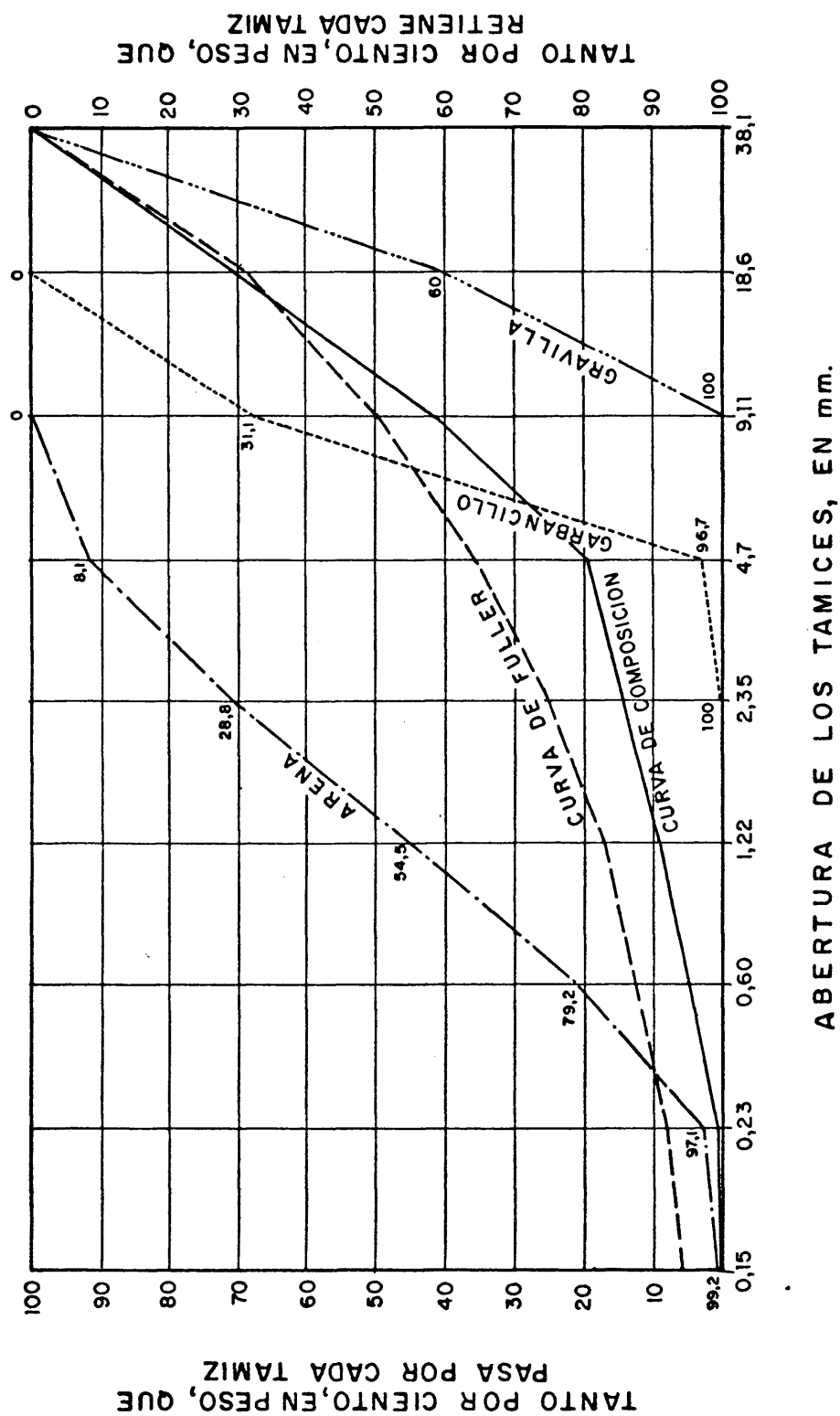
PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

— CURVA GRANULOMETRICA
- - GRANULOMETRIA FINA



PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CURVA GRANULOMETRICA
GRANULOMETRIA GRUESA



Para el moldeo de las probetas se han empleado, como moldes, tubos P.V.C. rígido.

De cada dosificación se han fabricado nueve probetas cilíndricas de 130 mm de diámetro y 70 mm de espesor.

Para comprobar si la compactación había sido correcta, de acuerdo con lo indicado en el párrafo III.2.3, se ha determinado la porosidad aparente del hormigón. El ensayo se ha realizado sobre tres probetas de cada serie y se ha determinado por la diferencia de pesos, de las mismas, secadas a 100°C y saturadas de agua, en vacío. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

SERIE	Porosidad aparente %			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Valor medio
P.1	12	11	11	11,3
P.2	11	12	10	11,0
P.3	10	12	11	11,0
P.4	12	13	13	12,6
P.5	12	12	11	11,6
P.6	11	11	11	11,0
P.7	11	11	12	11,3
P.8	12	11	12	11,6

y de ellos se deduce que la compactación de la masa de hormigón refleja una buena calidad del mismo.

Por otra parte, también se han realizado unos ensayos previos para la puesta a punto del dispositivo de ensayo y analizar la influencia de la impermeabilización; así como la eficacia

del impermeabilizante. Para ello se ha fabricado otra serie de nueve probetas cilíndricas de igual diámetro y altura que las primeras, 70 mm, con la relación agua/cemento 0,37 y granulometría fina, que se ha designado como serie P.0.

La figura 3, muestra el conjunto de las 81 probetas que se han fabricado especialmente para los ensayos; algunas de ellas con el impermeabilizante aplicado para evitar el efecto de borde, al que se hace referencia más adelante (Apartado IV.3.2, punto 4).

IV.3.- Puesta a punto y ensayos previos.

IV.3.1.- Puesta a punto del dispositivo de ensayo.

Una vez construido el permeabilímetro se comprobó la estan-quidad de las cámaras, de presión y de recogida del aire filtrado, sometiéndolas a una presión neumática de 4 kp/cm^2 . Igualmente y una vez colocada una probeta, se comprobó la estanquidad de las juntas y de todo el sistema en general, a presiones muy superiores a las que en los ensayos iba a estar sometido cada elemento. Principalmente en el de medida de los caudales de aire filtrado en que se podía prever una presión máxima de 4 a 5 mm.c.a., sobre la atmosférica, se comprobó la estanquidad a 400 mm.c.a.

La mecánica de los ensayos, para determinar la permeabilidad, ha consistido, esencialmente, en elevar la presión en la cámara de aire a presión y medir los caudales de aire que pasaban a través de la probeta, una vez que se había establecido el régimen estacionario.

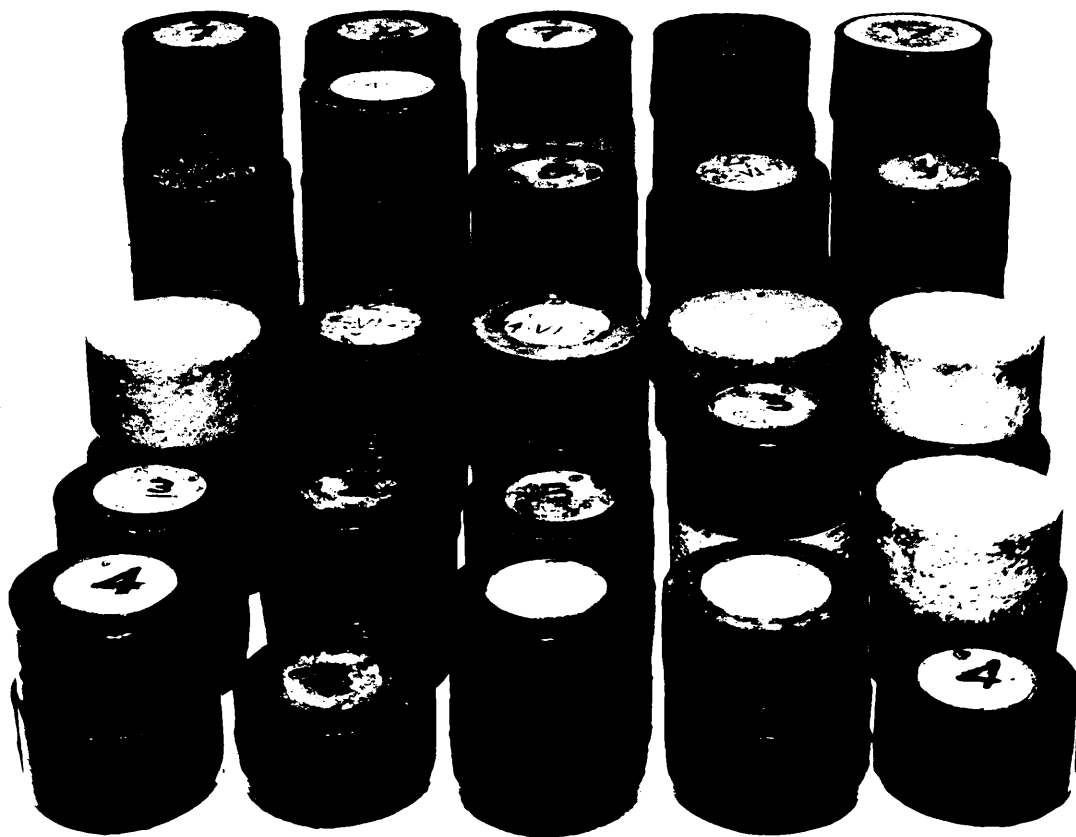


Figura 3

Conjunto de las 81 probetas fabricadas para la realización de los ensayos.

IV.3.2.- Ensayos previos.

Los ensayos previos, que se han efectuado, han tenido por objeto conocer, especialmente, los siguientes puntos:

- 1 - Si los resultados obtenidos en los ensayos efectuados en las mismas condiciones eran reproducibles. Reproducibilidad del método de ensayo.
- 2 - Si el método de ensayo altera la estructura interna del material y, por consiguiente, influye en los resultados de los ensayos sucesivos. Estabilidad de la estructura - de la probeta.
- 3 - Si como consecuencia de la inversión del sentido del flujo de aire, en la probeta, se obtenían resultados distintos. Isotropismo axial del material.
- 4 - La influencia y eficacia de la impermeabilización de la probeta para conocer y evitar el efecto de borde. Impermeabilización.

- 1 - Reproducibilidad del método de ensayo.

La comprobación de la reproducibilidad del método de ensayo - se ha efectuado sobre la probeta 1 de la serie P.O., destinada a estas comprobaciones previas, y ha consistido en repetir el ensayo tres veces, sometiendo la probeta a tres escalones de presión, iguales, en cada uno de ellos.

Con el fin de que los resultados ofrecieran una mayor garantía, cada ensayo, se ha repetido completamente; desmontándose la probeta del dispositivo después de terminado y volviéndola a poner para efectuar el siguiente.

Los resultados obtenidos que se presentan a continuación, se han tomado del Anejo nº 1 que incluye con detalle los valores de las medidas efectuadas.

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

Ensayo nº	Probeta	Presión de ensayo mm. de Hg	Caudales de aire dm ³ /hr y m ²
1	P.O.1	360	17,8
		740	42,4
		1.080	70,2
2	P.O.1	360	17,6
		740	43,8
		1.080	69,4
3	P.O.1	360	18,0
		740	43,6
		1.080	71,1

A la vista de estos resultados puede considerarse que la re -
producibilidad de los mismos es satisfactoria.

2 - Estabilidad de la estructura de las probetas.

La comprobación de que la estructura de las probetas no se al
tera, como consecuencia del propio ensayo, podría considerarse como efectuada por los resultados obtenidos en el análisis anterior.

No obstante, se ha realizado, independientemente, la comprobación de la estabilidad ensayando la probeta P.O.2 a presiones crecientes y decrecientes, sucesivamente. Es decir, un primer ensayo se ha efectuado con el siguiente orden de presiones: - 200; 400; 600 y 800 mm de Hg; un segundo ensayo en el orden: 800, 600; 400 y 200 mm de Hg y un tercer ensayo a 200; 400; - 600 y 800 mm de Hg.

A continuación se presentan los resultados obtenidos, recogidos del Anejo nº 1, que incluye los valores medidos.

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

Ensayo nº	Probeta	Presión de ensayo mm de Hg	Caudal de aire dm ³ /hr y m ²
4	P.O.2	360	18,9
		740	44,3
		1.080	72,8
5	P.O.2	360	18,5
		740	45,1
		1.080	71,4
6	P.O.2	360	19,4
		740	44,4
		1.080	72,2

A la vista de estos resultados se deduce que la estructura - interna del material no es afectada por los ensayos.

3 - Isotropismo axial del material.

La comprobación se ha efectuado con la probeta P.O.1, a continuación del ensayo de reproducibilidad y ha consistido en someter, dicha probeta, a iguales escalones de presión, pero aplicados en la cara opuesta.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación, tomados del Anejo nº 1. Con el fin de facilitar la comparación de dichos resultados, se incluyen, también, los valores correspondientes al ensayo de reproducibilidad.

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

Ensayo nº	Probeta	Presión de ensayo, mm de Hg	Caudal de aire dm ³ /hr y m ² (1)	Caudal de aire dm ³ /hr y m ² (2)
7	P.O.1	360	17,8	18,3
		740	43,3	43,4
		1.080	70,2	69,6

De la comparación de estos resultados se deduce que la masa - del hormigón puede considerarse como axialmente isotrópica para estos ensayos.

(1) Valores obtenidos en los ensayos de reproducibilidad. (Valores medios de los tres ensayos).

(2) Valores obtenidos aplicando la presión en la cara opuesta, a la del ensayo anterior.

4 - Impermeabilización.

El análisis efectuado puede dividirse en dos partes esencia -
les:

a) Comportamiento de distintos tipos de impermeabilizantes, -
aplicados sobre la superficie de la probeta.

b) Influencia de la impermeabilización de la superficie de la
probeta.

a) Comportamiento de los distintos tipos de impermeabilizantes.

Este estudio ha consistido en aplicar sobre algunas de las -
probetas de la serie P.O., destinada a los ensayos previos, -
distintos tipos de pinturas y comprobar su efecto sobre la -
permeabilidad.

Cada probeta ha sido sometida a los mismos ensayos, antes y -
después de aplicarles el impermeabilizante; pero con tiempo -
suficiente para que éste secara. El impermeabilizante se ha -
aplicado cubriendo toda la superficie de la probeta; salvo la
que corresponde a la superficie libre de salida del aire, en
la cara opuesta a la sometida a presión, como se indica en la
figura 4. La línea llena representa la superficie impermeabi-
lizada.

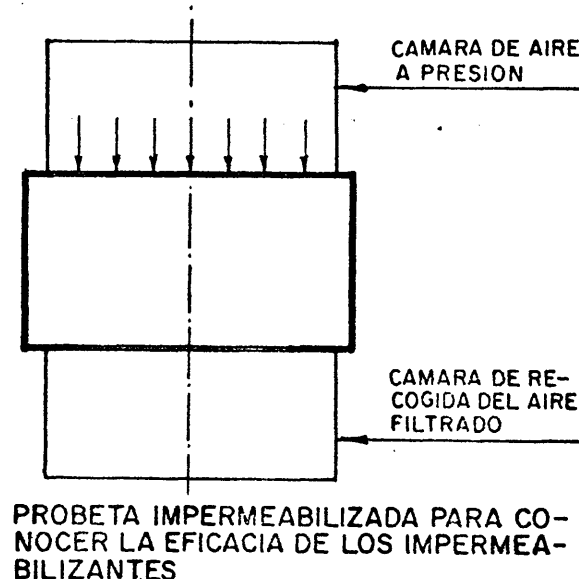


Figura 4

Los resultados obtenidos se dan a continuación y han sido tomados del Anejo nº 1, que incluye con detalle los valores medidos en los ensayos.

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

ENSAYO Nº	PROBETA	TIPO DE IMPERMEABILIZANTE APLICADO	PRESION DE ENSAYO mm de Hg	CAUDAL DE AIRE dm ³ /hr y m ²		REDUCCION DE PASO DE AIRE %
				NO IMPERMEABILIZADA	IMPERMEABILIZADA	
8	P.O.6	Plástico líquido sin disolvente	200	79,7	44,3	44,5
			400	171,0	93,9	45,2
			600	278,8	148,0	46,7
			800	404,8	227,7	43,8
9	P.O.7	Emulsión asfáltica con disolvente de gasolina	200	62,9	61,4	2,4
			400	133,5	128,9	3,4
			600	216,1	205,7	5,5
			800	317,8	304,7	4,1
10	P.O.8	Plomo electrolítico con disolvente de aceite de linaza	200	86,6	78,3	9,6
			400	186,9	171,4	8,3
			600	301,8	279,4	7,4
			800	435,2	380,0	12,6
11	P.O.9	Resina epoxi líquida	200	79,0	0	100
			400	134,2	0	100
			600	304,5	0	100
			800	486,2	0	100

Estos resultados coinciden con las conclusiones a que han llegado distintos investigadores sobre la ineficacia de los impermeabilizantes corrientemente empleados hasta hace pocos años y que ha quedado recogido en el Apartado II. El ser relativamente reciente la aplicación de la resina epoxi líquida es, posiblemente, la razón de que no se haga mención de este tipo de impermeabilizante en los trabajos consultados.

A la vista de los resultados anteriores se consideró la conveniencia de emplear como impermeabilizante la resina epoxi líquida en un espesor suficiente para que garantizara su impermeabilidad a las presiones de ensayo.

La comprobación de dicha impermeabilidad se ha efectuado por medio de un anillo metálico que dejaba la probeta en su interior, quedando una cámara de aire hermética, como puede apreciarse en la figura 5. El paso de aire a través del impermeabilizante lo acusaba el manómetro de columna de agua.

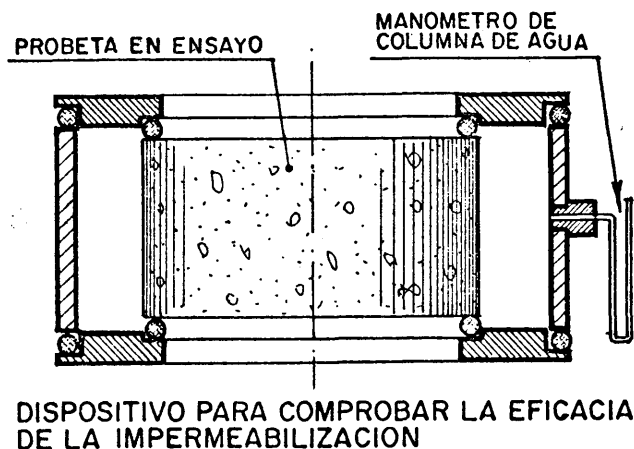


Figura 5

Para conocer qué espesor de la capa de pintura era suficiente se dió una primera capa de imprimación, del orden de 0,4 mm - de espesor; observando que al someter la superficie superior de la probeta a presión el manómetro de columna de agua acusaba una sobrepresión en la cámara de unos 30 mm de columna de agua. A continuación se aplicó una segunda capa de impermeabilizante, con lo que el espesor total resultaba del orden de - 0,8 milímetros. En estas condiciones el manómetro no señaló - ninguna sobrepresión, después de dos horas de haber estado sometida la probeta a una presión de 1.200 mm Hg; esto es, una presión superior en un 50% a la máxima prevista en los ensayos.

b) Influencia de la impermeabilización de la superficie de la probeta.

Al obligar el dispositivo de ensayo a dejar una corona circular impermeabilizada, (figura 6), resultaba necesario conocer la posible influencia que la diferencia de secciones, la total de la probeta y la sección libre de paso (de 13 y 8 cm de diámetro, respectivamente) podría tener al deducir los caudales de aire filtrado por unidad de superficie.

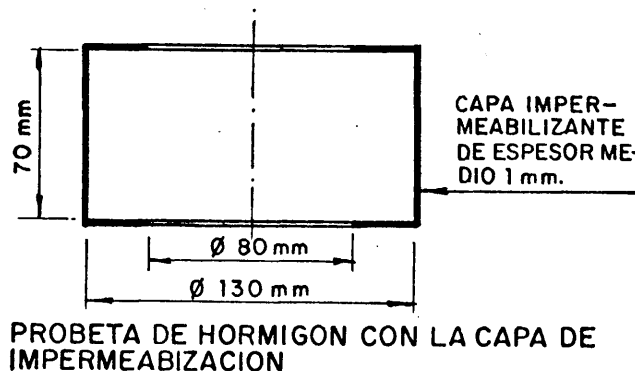


Figura 6

Para ello se eligieron tres probetas, cada una de una serie diferente, que se han ensayado en dos condiciones. Una dejando la superficie libre de paso prevista $48,38 \text{ cm}^2$, correspondiente al diámetro de 8 cm; y otra disminuyendo la superficie libre de paso a la mitad, $24,19 \text{ cm}^2$. Estos ensayos se realizaron posteriormente a los sistemáticos, que se describen más adelante, y se obtuvieron los siguientes resultados. El detalle de los mismos figura en el Anejo nº 1.

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION Y DE LA SUPERFICIE

LIBRE DE PASO A 20°C Y 760 mm DE Hg

PROBETA	SUPERFICIE LIBRE DE PASO cm ²	PRESION DE ENSAYO mm de Hg	CAUDAL DE AIRE FILTRADO cm ³ /h	CAUDAL DE AIRE FILTRA DO POR cm ² DE SUPERFI CIE LIBRE DE PASO cm ³ /h Y cm ²
P.2.5	48,38	200	696	14
		400	1.539	32
		600	2.512	52
		800	3.611	75
	24,19	200	347	14
		400	778	32
		600	1.297	54
		800	1.766	73
P.3.1.	48,38	200	966	20
		400	2.138	44
		600	3.487	72
		800	5.018	104
	24,19	200	479	20
		400	1.062	44
		600	1.748	72
		800	2.507	104
P.6.3	48,38	200	1.833	38
		400	3.698	76
		600	5.997	124
		800	8.660	179
	24,19	200	885	37
		400	1.882	77
		600	2.857	118
		800	4.252	176

Lo que comprueba que una vez obtenido el régimen estacionario, el flujo de aire resulta proporcional a la superficie libre de paso, sin que influya el anillo de guarda creado por la capa impermeabilizante.

También con las probetas P.2.5 y P.6.3 y a la presión de 400 milímetros de Hg, se ha efectuado la siguiente comprobación:

Se ha dejado en una cara la superficie de paso de $48,38 \text{ cm}^2$ y en la opuesta se ha reducido a $24,18 \text{ cm}^2$, con lo que se ha establecido un canal libre de forma troncocónica de sección media $36,28 \text{ cm}^2$, aproximadamente.

La experiencia se ha realizado sometiendo a presión de aire una de las caras y, después, se ha repetido el ensayo invirtiendo el sentido del flujo. Es decir, dando la presión a la otra cara, (figura 7).

Los valores de los caudales obtenidos han sido iguales, para cada probeta; y, además, se ha conservado la misma proporción en función de la superficie libre de paso.

Para facilitar la comprensión de lo dicho, a continuación se presentan los resultados obtenidos en esta experiencia.

CAUDALES DE AIRE FILTRADO POR CENTIMETRO CUADRADO DE SUPERFICIE LIBRE, A 20 GRADOS CENTIGRADOS Y 760 MILIMETROS DE Hg

Probeta	Presión de ensayo mm de Hg	Superficies libres de paso		
		$48,38 \text{ cm}^2$	$36,28 \text{ cm}^2$	$24,19 \text{ cm}^2$
P.2.5	400	32	32	32
P.6.3	400	76	77	77

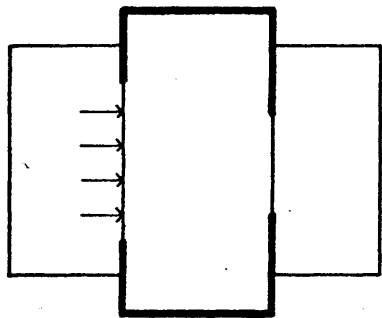
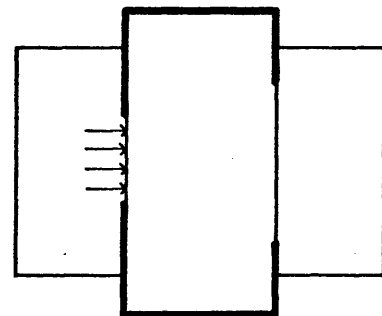


Figura 7

- a) sometiendo a presión la superficie libre de paso mayor.
- b) sometiendo a presión la superficie libre de paso menor.

IV.4.- Ensayos sistemáticos y resultados obtenidos.

Terminados los ensayos previos que han permitido comprobar: la validez del dispositivo, diseñado especialmente para la realización del trabajo experimental; la estabilidad e isotropismo del hormigón, dentro de los límites que precisa el presente estudio; y la eficacia del impermeabilizante, sin que el mismo -al crear un anillo de guarda- afecte a los caudales medidos, expresados por unidad de superficie, se procedió a efectuar los ensayos sistemáticos.

Estos han consistido en medir los caudales de aire que pasaban a través de las probetas de hormigón a cuatro escalones de presión: 200; 400; 600 y 800 mm de Hg, sobre la presión atmosférica.

Por otra parte, dichos ensayos, se han realizado teniendo previamente las probetas conservadas al ambiente y después -desechadas en estufa, hasta peso constante, a 40; 60 y 80°C.

El procedimiento seguido en los ensayos ha consistido en someter una de las superficies de la probeta a la sobrepresión de ensayo y una vez conseguido el régimen estacionario, que tardaba en producirse del orden de hora y media, efectuar las medidas a intervalos de tiempo suficiente para obtener resultados significativos y de acuerdo con la capacidad de la campana. El tiempo empleado para cada presión ha sido de 10 a 30 minutos y se hacían de 6 a 10 lecturas.

De cada serie se ensayaban cuatro probetas y en aquellos casos en que se observaba mucha dispersión se han ensayado una o dos probetas más de las que quedaban de la serie de nueve probetas, con el fin de disponer de resultados representativos.

Los valores medidos figuran en el Anejo nº 1 y en él se recogen las tablas confeccionadas para reducir los valores obtenidos a condiciones normales de referencia, 20°C de temperatura y 760 mm de Hg de presión.

A continuación se incluyen los cuadros 1 al 32 con los resultados definitivos y los gráficos que se deducen de dichos cuadros, (gráficos I al XXXII).

IV.5.- Análisis de los resultados obtenidos.

El análisis de los resultados obtenidos ha de tener por objeto estudiar la relación existente entre los cuadales de paso de aire, a través del hormigón, en función de:

- la diferencia de presión entre las superficies opuestas de la probeta,
- el tipo de dosificación,
- el secado de la masa de hormigón, y
- el espesor de las probetas.

Para realizar este análisis se han confeccionado los cuadros números 33 al 40, que recogen los valores medios de los resultados obtenidos de cada serie; así como los gráficos correspondientes, del XXXIII al XL, y que se incluyen a continuación.

CUADRO N° 1

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.1. RELACION $a/c = 0,37$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 9 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 14 al 20 de Febrero de 1973.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: al ambiente del laboratorio.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.1.1.	2.295,4	200	53,0
		400	110,9
		600	187,3
		800	263,5
P.1.2.	2.358,7	200	72,1
		400	154,7
		600	252,9
		800	358,4
P.1.3.	2.327,7	200	57,0
		400	121,7
		600	208,9
		800	293,6
P.1.4.	2.305,7	200	45,2
		400	94,8
		600	154,6
		800	222,1
P.1.5		200	
		400	
		600	
		800	
P.1.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 2

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.2. RELACION $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 11 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 22 de Febrero al 22 de Marzo de 1973.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: al ambiente del laboratorio.

OBSERVACIONES: La probeta P.2.6 se ensayó el 12 de Febrero de 1974.

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.2.1.	2.300,2	200	95,5
		400	207,3
		600	333,8
		800	478,8
P.2.2.	2.317,6	200	94,1
		400	208,1
		600	328,0
		800	476,1
P.2.3.	2.268,5	200	49,6
		400	105,0
		600	169,9
		800	238,4
P.2.4.	2.260,-	200	114,3
		400	252,9
		600	424,7
		800	602,4
P.2.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.2.6.	2.295,6	200	45,1
		400	97,1
		600	159,5
		800	231,6

CUADRO N° 3

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.3. RELACION $\alpha/c = 0,47$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 14 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 22 al 27 de Marzo de 1973.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas al ambiente del laboratorio.

OBSERVACIONES: Las probetas P.3.5 y P.3.6 se ensayaron en Febrero de 1974.

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.3.1.	2.277,9	200	129,4
		400	281,8
		600	460,0
		800	653,7
P.3.2.	2.247,5	200	152,2
		400	344,8
		600	556,4
		800	798,9
P.3.3.	2.292,4	200	107,2
		400	225,6
		600	373,9
		800	528,7
P.3.4.	2.260,3	200	87,6
		400	191,6
		600	318,5
		800	453,2
P.3.5.	2.261,0	200	85,1
		400	181,0
		600	306,4
		800	429,1
P.3.6.	2.326,7	200	123,5
		400	270,4
		600	445,8
		800	644,3

CUADRO N° 4

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESIONSERIE: P.4. RELACION $\alpha/c = 0,52$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 18 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 28 al 30 de Marzo de 1973.

CONSERVACION DE LAS PRÓBETAS: Secadas al ambiente del laboratorio.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a a 20°C y 760mm Hg
P.4.1.	2.282,6	200	141,3
		400	305,1
		600	485,7
		800	682,3
P.4.2.	2.304,5	200	163,6
		400	353,2
		600	575,8
		800	849,8
P.4.3.	2.311,0	200	136,2
		400	290,8
		600	457,0
		800	670,0
P.4.4.	2.311,0	200	112,0
		400	249,7
		600	399,1
		800	570,3
P.4.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.4.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 5

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.5. RELACION $\alpha/c = 0,37$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 21 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 30 de Marzo al 4 de Abril de 1973.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: al ambiente del laboratorio.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.5.1.		200 400 600 800	
P.5.2.	2.280,5	200 400 600 800	235,6 523,7 827,1 1.208,2
P.5.3.	2.306,3	200 400 600 800	174,9 388,1 617,2 872,5
P.5.4.	2.300,8	200 400 600 800	235,8 511,0 811,9 1.160,6
P.5.5.	2.277,0	200 400 600 800	280,0 593,5 993,1 1.417,9
P.5.6.		200 400 600 800	

CUADRO N° 7

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.7.: RELACION $a/c = 0,47$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 24 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 9 al 10 de Abril de 1973.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: al ambiente del laboratorio.

OBSERVACIONES: Ver hoja siguiente.

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.7.1.	2.313,5	200	205,1
		400	447,1
		600	747,2
		800	1.073,5
		200	
		400	
		600	
		800	
P.7.3.	2.354,7	200	155,2
		400	341,0
		600	557,5
		800	776,4
P.7.4.	2.313,4	200	59,6
		400	134,3
		600	214,9
		800	306,3
P.7.5.	2.309,-	200	486,0
		400	1.063,4
		600	1.799,7
		800	2.536,1
P.7.6.		200	109,4
		400	240,6
		600	412,3
		800	617,4

CUADRO N° 7-a
CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.7. RELACION $\alpha/c = 0,47$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 24 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 13 al 14 de Febrero de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: al ambiente del laboratorio.

OBSERVACIONES: Estos ensayos se han realizado a la vista de la dispersión de los resultados anteriores.

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.7.1.		200	
		400	
		600	
		800	
P.7.2.	2.337,5	200	259,5
		400	583,7
		600	969,8
		800	1.370,6
P.7.3.	2.353,7	200	184,9
		400	419,4
		600	666,3
		800	955,7
P.7.4.		200	
		400	
		600	
		800	
P.7.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.7.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 8

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.8. RELACION $a/c = 0,52$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 28 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 11 al 17 de Abril de 1973.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: al ambiente del laboratorio.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.8.1.		200	
		400	
		600	
		800	
P.8.2.	2.242,4	200	155,5
		400	337,1
		600	537,5
		800	765,4
P.8.3.	2.243,1	200	139,0
		400	296,9
		600	459,1
		800	679,1
P.8.4.	2.336,9	200	153,2
		400	330,2
		600	526,7
		800	750,1
P.8.5.	2.272,0	200	294,0
		400	625,8
		600	1.022,4
		800	1.449,0
P.8.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 9

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.1. RELACION $a/c = 0,37$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 9 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 14 de Octubre al 20 de Noviembre de 1973.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 40°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.1.1.	2.289,5	200	57,4
		400	137,2
		600	224,4
		800	320,3
P.1.2.	2.356,5	200	80,4
		400	178,3
		600	280,2
		800	417,4
P.1.3.	2.324,1	200	59,1
		400	141,2
		600	229,2
		800	325,5
P.1.4.	2.302,7	200	59,6
		400	112,6
		600	180,0
		800	281,8
P.1.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.1.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 10

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.2. RELACION $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 11 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 21 al 27 de Noviembre de 1973.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 40°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.2.1.	2.297,5	200	107,2
		400	244,0
		600	406,0
		800	561,8
P.2.2.	2.314,6	200	111,2
		400	247,9
		600	404,4
		800	573,8
P.2.3.		200	
		400	
		600	
		800	
P.2.4.	2.258,6	200	132,3
		400	285,2
		600	460,2
		800	683,3
P.2.5.	2.306,7	200	92,3
		400	197,0
		600	314,0
		800	453,1
P.2.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 11

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.3. RELACION $a/c = 0,47$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 14 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 27 de Noviembre al 4 de Diciembre de 1973.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 40°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.3.1.	2.276,4	200	134,7
		400	306,8
		600	498,6
		800	710,9
P.3.2.	2.245,6	200	173,0
		400	369,9
		600	605,9
		800	867,5
P.3.3.	2.290,5	200	116,9
		400	241,7
		600	400,6
		800	567,0
P.3.4.	2.258,6	200	102,9
		400	209,5
		600	339,4
		800	487,7
P.3.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.3.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 12

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.4. RELACION $a/c = 0,52$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 18 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 4 al 6 de Diciembre de 1973.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 40°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.4.1.		200	
		400	
		600	
		800	
P.4.2.	2.302,1	200	182,9
		400	416,9
		600	693,2
		800	972,3
P.4.3.	2.308,5	200	165,7
		400	359,5
		600	586,9
		800	838,6
P.4.4.	2.307,6	200	124,1
		400	278,8
		600	459,4
		800	662,4
P.4.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.4.6.	2.351,7	200	204,9
		400	443,2
		600	720,0
		800	1.029,4

CUADRO N° 13

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.5. RELACION $a/c = 0,37$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 21 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 6 al 17 de Diciembre de 1973.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 40°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.5.1.		200	
		400	
		600	
		800	
P.5.2.	2.279,5	200	254,1
		400	588,5
		600	946,8
		800	1.389,4
P.5.3.	2.304,5	200	190,5
		400	424,5
		600	684,3
		800	1.029,9
P.5.4.	2.297,5	200	306,1
		400	665,3
		600	1.052,0
		800	1.497,4
P.5.5.	2.274,7	200	359,4
		400	835,8
		600	1.315,8
		800	1.869,8
P.5.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 14

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.6. RELACION $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 23 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 17 de Diciembre de 1973 al 9 de Enero de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 40°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.6.1.	2.289,5	200	218,8
		400	480,6
		600	805,7
		800	1.140,2
P.6.2.	2.316,3	200	212,6
		400	463,5
		600	761,1
		800	1.067,4
P.6.3.	2.294,4	200	244,8
		400	537,3
		600	872,4
		800	1.242,4
P.6.4.	2.295,5	200	237,5
		400	547,7
		600	895,7
		800	1.252,5
P.6.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.6.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 15

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.7. RELACION $\alpha/c = 0,47$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 24 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 9 al 15 de Enero de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 40°C

OBSERVACIONES: Los caudales incluidos en las probetas P.7.2 y P.7.3 se han deducido de los valores de los ensayos, obtenidos - en toda la serie P.7, en las condiciones de ambiente y secado a 40, 60 y 80°C, aplicando diferencias finitas.

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.7.1	2.309,8	200	266,1
		400	591,5
		600	937,8
		800	1.330,6
P.7.2		200	303,0
		400	682,0
		600	1.133,0
		800	1.602,0
P.7.3.		200	181,0
		400	398,0
		600	651,0
		800	907,0
P.7.4.	2.312,6	200	76,4
		400	158,8
		600	254,4
		800	365,2
P.7.5.	2.307,8	200	600,9
		400	1.338,4
		600	2.242,9
		800	3.158,2
P.7.6.	2.362,9	200	125,6
		400	269,6
		600	446,9
		800	643,4

CUADRO N° 16

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.8. RELACION $\alpha/c = 0,52$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 28 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 15 al 23 de Enero de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 40°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.8.1.		200 400 600 800	
P.8.2.	2.239,8	200 400 600 800	176,6 425,5 672,1 977,9
P.8.3.	2.240,5	200 400 600 800	170,0 373,3 621,0 881,7
P.8.4.	2.333,5	200 400 600 800	186,0 417,0 694,1 989,5
P.8.5.		200 400 600 800	
P.8.6.	2.261,1	200 400 600 800	261,5 571,5 910,0 1.324,4

CUADRO N° 17

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.1. RELACION $\alpha/c = 0,37$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 9 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 5 al 7 de Febrero de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 60°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.1.1.	2.284,7	200	77,3
		400	163,8
		600	263,6
		800	376,4
P.1.2.	2.349,1	200	111,6
		400	237,3
		600	382,4
		800	534,2
P.1.3.	2.316,9	200	92,5
		400	178,8
		600	279,4
		800	400,0
P.1.4.	2.297,4	200	68,0
		400	147,8
		600	237,1
		800	323,2
P.1.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.1.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 18

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.2. RELACION $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 11 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 15 al 21 de Febrero de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 60°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² α α 20°C y 760mm Hg
P.2.1.	2.291,2	200	127,4
		400	280,7
		600	463,7
		800	663,8
P.2.2.	2.310,6	200	141,6
		400	300,1
		600	483,1
		800	679,2
P.2.3.		200	
		400	
		600	
		800	
P.2.4.	2.247,6	200	193,2
		400	421,8
		600	677,8
		800	985,1
P.2.5.	2.297,7	200	120,3
		400	265,7
		600	434,9
		800	607,3
P.2.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 19

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.3. RELACION $\alpha/c = 0,47$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 14 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 21 al 28 de Febrero de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 60°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.3.1.	2.270,5	200	177,0
		400	393,4
		600	622,3
		800	899,3
P.3.2.	2.239,5	200	214,9
		400	470,1
		600	777,8
		800	1.105,6
P.3.3.	2.282,7	200	142,2
		400	316,1
		600	504,1
		800	706,0
P.3.4.	2.249,2	200	117,5
		400	239,3
		600	402,8
		800	580,9
P.3.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.3.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 20

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.4. RELACION $\alpha/c = 0,52$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 18 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 1 al 6 de Marzo de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 60°C

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.4.1.		200	
		400	
		600	
		800	
P.4.2.	2.294,2	200	244,5
		400	541,3
		600	888,3
		800	1.295,9
P.4.3.	2.301,7	200	230,1
		400	494,1
		600	803,8
		800	1.179,5
P.4.4.	2.300,8	200	166,2
		400	360,6
		600	605,7
		800	855,4
P.4.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.4.6.	2.346,0	200	258,4
		400	559,4
		600	919,3
		800	1.331,6

CUADRO N° 21

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.5. RELACION $\alpha/c = 0,37$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 21 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 6 al 11 de Marzo de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 60°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.5.1.		200	
		400	
		600	
		800	
P.5.2.	2.269,3	200	418,0
		400	914,1
		600	1.489,7
		800	2.119,8
P.5.3.	2.295,2	200	327,8
		400	711,9
		600	1.162,9
		800	1.644,2
P.5.4.	2.291,3	200	426,4
		400	896,6
		600	1.420,6
		800	2.032,2
P.5.5.	2.267,6	200	493,2
		400	1.053,3
		600	1.707,5
		800	2.444,5
P.5.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 22

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.6. RELACION $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 23 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 12 al 14 de Marzo de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 60°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.6.1.	2.284,2	200	296,5
		400	637,7
		600	1.041,7
		800	1.505,7
P.6.2.	2.310,4	200	306,5
		400	660,4
		600	1.065,8
		800	1.484,6
P.6.3.	2.287,1	200	326,0
		400	710,2
		600	1.121,6
		800	1.653,3
P.6.4.	2.290,8	200	329,2
		400	708,5
		600	1.135,0
		800	1.629,6
P.6.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.6.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 23

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.7. RELACION $\alpha/c = 0,47$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 24 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 15 al 25 de Marzo de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 60°C.

OBSERVACIONES: Los caudales incluidos en las probetas P.7.2 y P.7.3 se han deducido de los valores de los ensayos, obtenidos en toda la serie P.7 en las condiciones de ambiente y secado a 40, 60 y 80°C, aplicando diferencias finitas.

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.7.1.	2.305,1	200	330,0
		400	764,9
		600	1.217,3
		800	1.729,5
P.7.2.		200	418,0
		400	941,0
		600	1.563,0
		800	2.210,0
P.7.3.		200	249,0
		400	549,0
		600	898,0
		800	1.251,0
P.7.4.	2.306,5	200	119,4
		400	245,2
		600	394,0
		800	567,4
P.7.5.	2.301,3	200	944,5
		400	1.933,1
		600	3.200,4
		800	4.502,7
P.7.6.	2.356,5	200	165,3
		400	356,7
		600	582,5
		800	846,7

CUADRO N° 24

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.8. RELACION $\alpha/c = 0,52$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 28 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 25 al 28 de Marzo de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 60°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.8.1.		200	
		400	
		600	
		800	
P.8.2.	2.233,0	200	255,1
		400	526,0
		600	916,4
		800	1.326,3
P.8.3.	2.234,1	200	251,5
		400	549,1
		600	890,6
		800	1.265,4
P.8.4.	2.328,1	200	266,5
		400	575,0
		600	933,7
		800	1.316,0
P.8.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.8.6.	2.256,6	200	316,3
		400	700,7
		600	1.127,4
		800	1.599,4

CUADRO N° 25

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.1. RELACION $\alpha/c = 0,37$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 9 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 28 de Marzo al 8 de Abril de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secada en estufa a 80°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.1.1.	2.277,5	200	106,3
		400	232,8
		600	343,8
		800	547,5
P.1.2.	2.340,9	200	170,8
		400	385,3
		600	605,0
		800	889,3
P.1.3.	2.307,0	200	117,3
		400	262,6
		600	426,5
		800	604,4
P.1.4.	2.289,8	200	91,9
		400	189,5
		600	305,7
		800	436,1
P.1.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.1.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 26

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.2. RELACION $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 11 de Junio de 1974.

FECHA DE ENSAYO: del 9 al 18 de Abril de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 80°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.2.1.	2.286,3	200	165,6
		400	361,6
		600	589,6
		800	853,7
P.2.2.	2.300,9	200	201,8
		400	433,9
		600	727,8
		800	1.042,3
P.2.3.		200	
		400	
		600	
		800	
P.2.4.	2.242,5	200	252,2
		400	552,4
		600	895,0
		800	1.293,3
P.2.5.	2.289,6	200	169,5
		400	368,3
		600	609,0
		800	873,0
P.2.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 27

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.3. RELACION $\alpha/c = 0,47$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 14 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 18 al 23 de Abril de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 80°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.3.1.	2.264,9	200	215,8
		400	470,8
		600	776,2
		800	1.099,8
P.3.2.	2.234,9	200	270,5
		400	584,7
		600	937,5
		800	1.375,0
P.3.3.	2.276,9	200	175,1
		400	381,0
		600	608,5
		800	893,0
P.3.4.	2.244,1	200	127,4
		400	285,1
		600	469,4
		800	668,1
P.3.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.3.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 28

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.4. RELACION $\alpha/c = 0,52$ GRANULOMETRIA: Fina.

FECHA DE FABRICACION: 18 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 23 al 29 de Abril de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 80°C.

OBSERVACIONES: Los valores de la P.4.2, P.4.3 y P.4.6 se han corregido, por interpolación, al no seguir la ley general. (Factor de corrección 0,96).

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.4.1.		200 400 600 800	
P.4.2.	2.289,6	200 400 600 800	291,4 630,3 1.055,0 1.490,1
P.4.3.	2.296,0	200 400 600 800	293,0 616,1 1.015,0 1.402,9
P.4.4.	2.295,0	200 400 600 800	205,0 441,4 747,2 1.102,2
P.4.5.		200 400 600 800	
P.4.6.	2.341,6	200 400 600 800	328,0 683,4 1.157,0 1.643,5

CUADRO N° 29

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESIONSERIE: P.5. RELACION $\alpha/c = 0,37$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 21 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 30 de Abril al 7 de Mayo de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 80°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.5.1.		200	
		400	
		600	
		800	
P.5.2.	2.264,7	200	548,9
		400	1.135,4
		600	1.866,9
		800	2.761,4
P.5.3.	2.289,4	200	479,7
		400	1.032,9
		600	1.719,8
		800	2.441,6
P.5.4.	2.284,7	200	578,6
		400	1.261,0
		600	2.031,9
		800	2.818,2
P.5.5.	2.259,7	200	704,7
		400	1.515,4
		600	2.483,4
		800	3.568,9
P.5.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 30

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.6. RELACION $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 23 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 7 al 10 de Mayo de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 80°C

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a a 20°C y 760mm Hg
P.6.1.	2.274,8	200	392,2
		400	834,8
		600	1.404,9
		800	1.993,4
P.6.2.	2.304,7	200	397,9
		400	858,6
		600	1.385,8
		800	1.941,2
P.6.3.	2.281,7	200	420,7
		400	897,5
		600	1.521,7
		800	2.087,6
P.6.4.	2.285,6	200	433,8
		400	891,0
		600	1.548,2
		800	2.118,4
P.6.5.		200	
		400	
		600	
		800	
P.6.6.		200	
		400	
		600	
		800	

CUADRO N° 31

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.7. RELACION $a/c = 0,47$ GRANULOMETRIA: Gruesa

FECHA DE FABRICACION: 24 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 10 al 17 de Mayo de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 80°C

OBSERVACIONES: Los caudales incluidos en las probetas P.7.2 y P.7.6 se han deducido de los valores de los ensayos, obtenidos en toda la serie P.7. en las condiciones de ambiente y secado a 40; 60 y 80°C, aplicando diferencias finitas.

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.7.1.	2.298,4	200	458,9
		400	942,5
		600	1.642,0
		800	2.314,8
P.7.2.		200	613,0
		400	1.381,0
		600	2.296,0
		800	3.246,0
P.7.3.	2.341,9	200	320,9
		400	674,7
		600	1.137,7
		800	1.608,8
P.7.4.	2.299,7	200	195,9
		400	432,5
		600	668,8
		800	933,5
P.7.5.	2.296,1	200	1.231,1
		400	2.439,0
		600	3.937,3
		800	5.402,3
P.7.6.		200	258,0
		400	568,0
		600	976,0
		800	1.462,0

CUADRO N° 32

CAUDAL DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.8. RELACION $\alpha/c = 0,52$ GRANULOMETRIA: Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 28 de Junio de 1971.

FECHA DE ENSAYO: del 20 al 22 de Mayo de 1974.

CONSERVACION DE LAS PROBETAS: Secadas en estufa a 80°C.

OBSERVACIONES:

PROBETA	PESO DE LA PROBETA pondios	PRESION DE ENSAYO mm Hg	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a a 20°C y 760mm Hg
P.8.1.		200 400 600 800	
P.8.2.	2.228,5	200 400 600 800	306,5 667,4 1.101,0 1.549,2
P.8.3.	2.224,0	200 400 600 800	330,3 691,8 1.113,2 1.586,1
P.8.4.	2.323,5	200 400 600 800	314,0 688,9 1.115,8 1.529,0
P.8.5.		200 400 600 800	
P.8.6.	2.251,3	200 400 600 800	394,3 856,3 1.392,0 1.983,9

GRAFICO 1

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

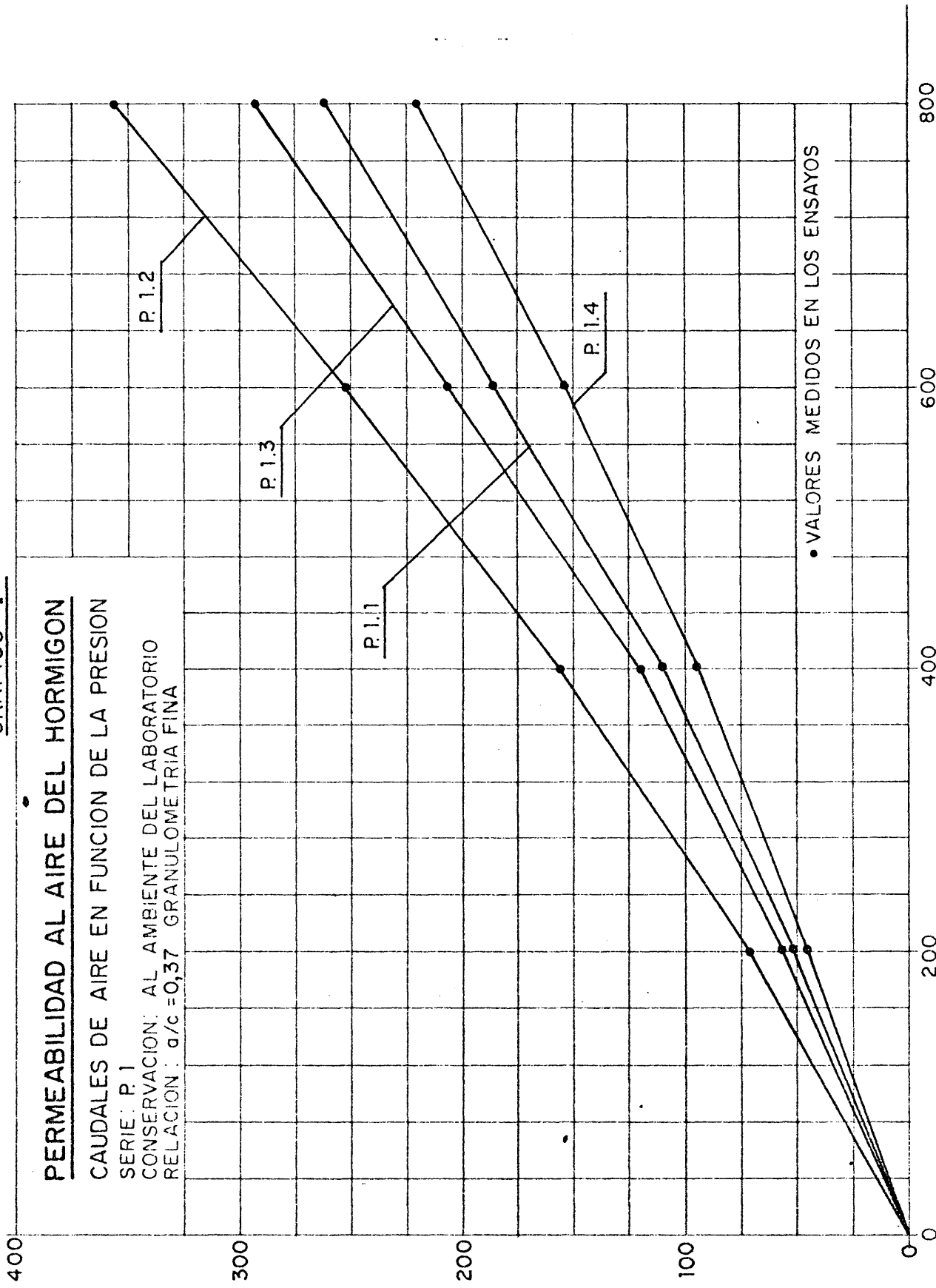
SERIE: P.1

CONSERVACION: AL AMBIENTE DEL LABORATORIO

RELACION: $a/c = 0,37$ GRANULOMETRIA FINA

CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a $20^\circ\text{C y } 760 \text{ mm Hg}$

PRESION EN mmHg



• VALORES MEDIDOS EN LOS ENSAYOS

GRAFICO II

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE P.2

CONSERVACION: AL AMBIENTE DEL LABORATORIO

RELACION: $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA FINA

CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a $20^\circ\text{C y } 760 \text{ mm Hg}$

PRESION EN mmHg

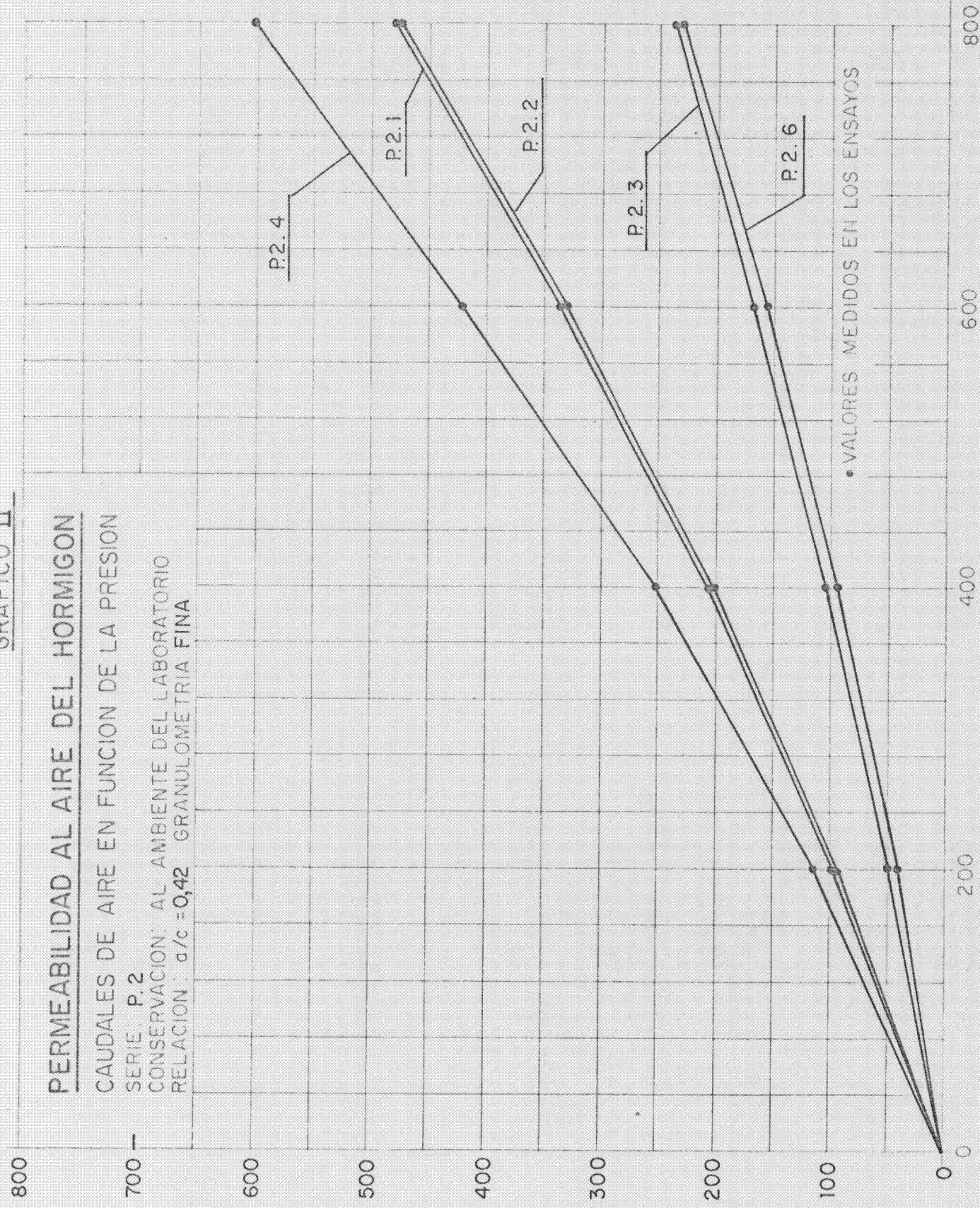


GRAFICO III

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.3

CONSERVACION: AL AMBIENTE DEL LABORATORIO

RELACION: $\alpha/c = 0,47$ GRANULOMETRIA FINA

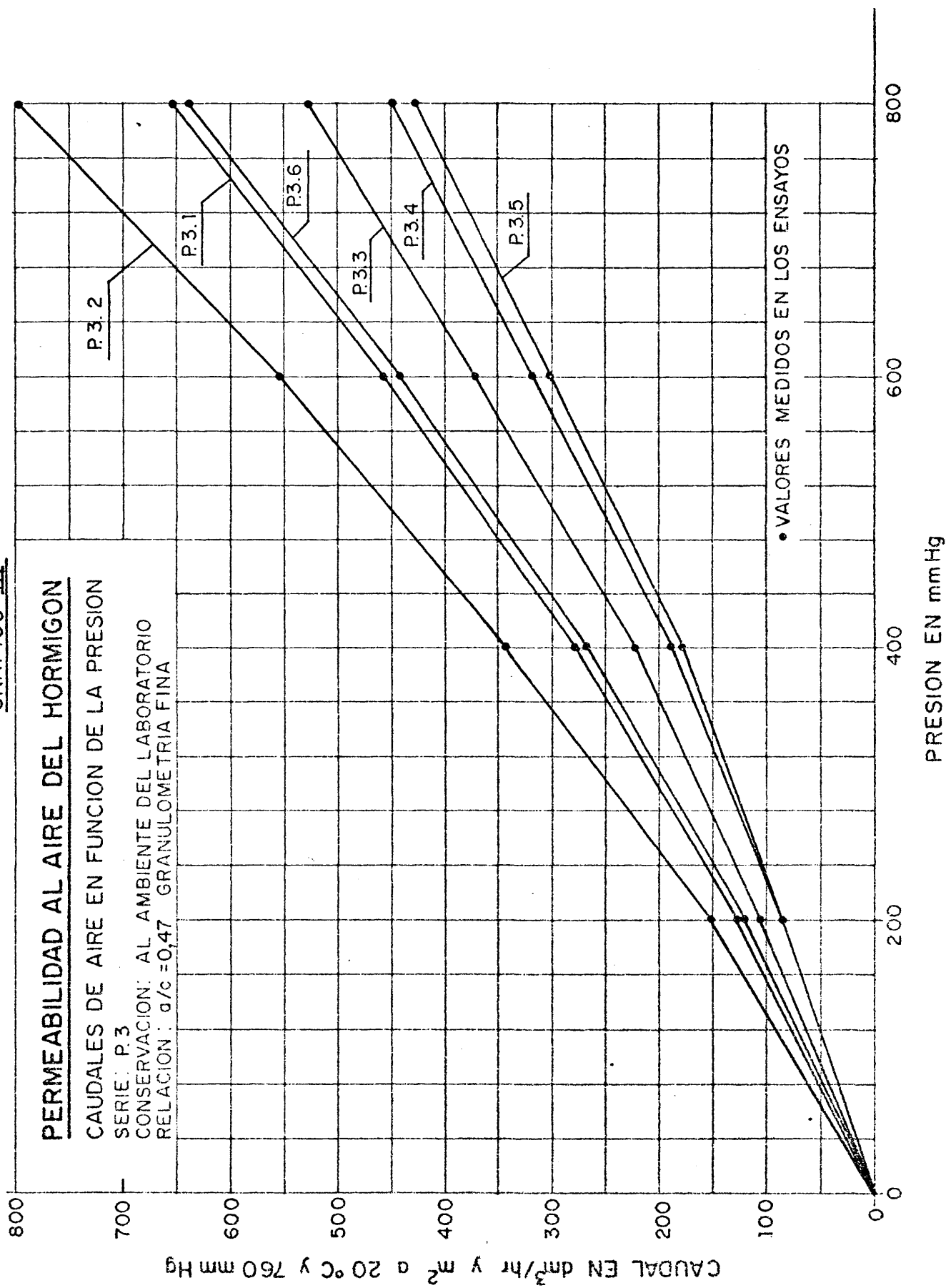


GRAFICO IV

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P 4

CONSERVACION: AL AMBIENTE DEL LABORATORIO

RELACION: $q/c = 0,52$ GRANULOMETRIA FINA

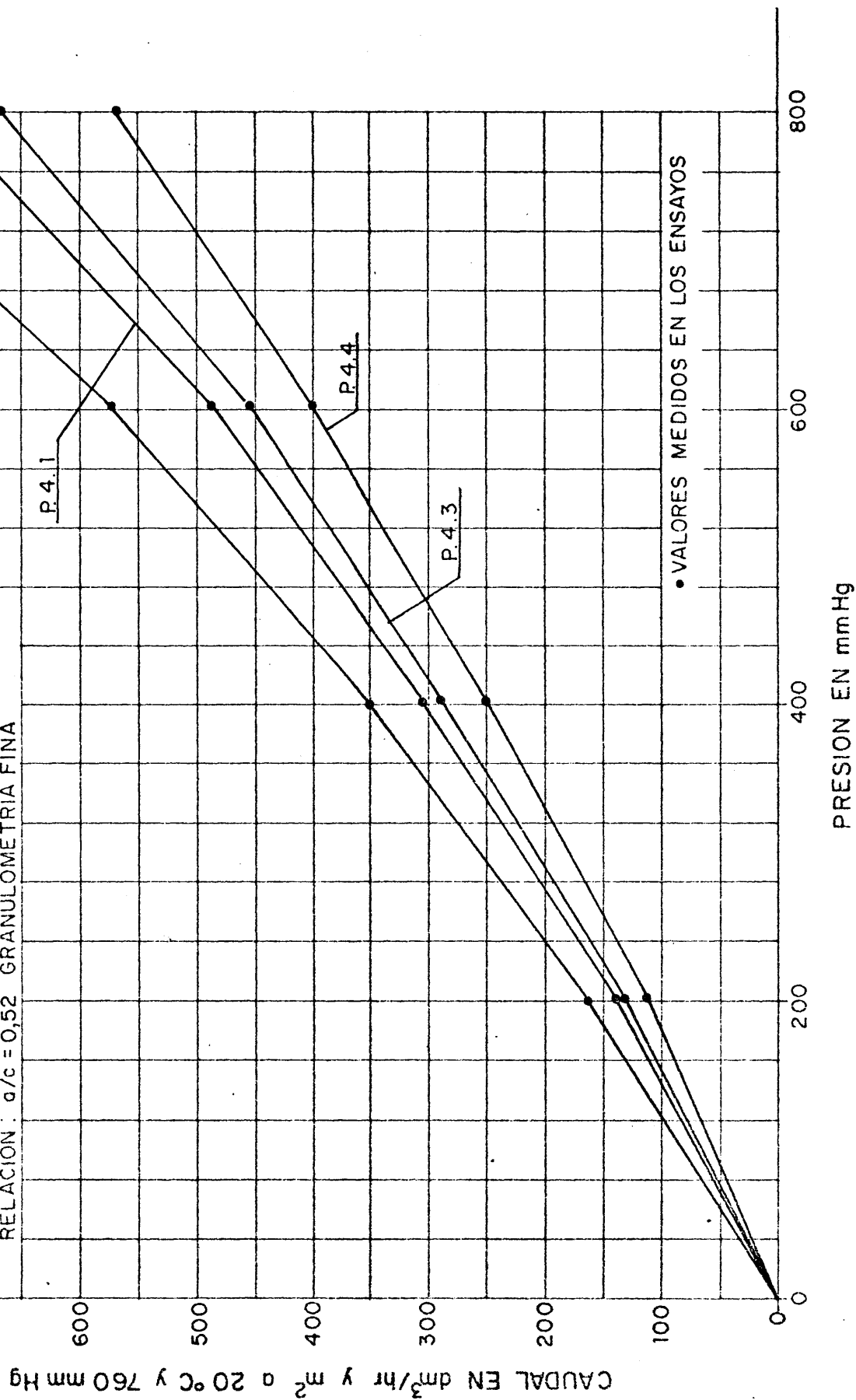


GRAFICO V

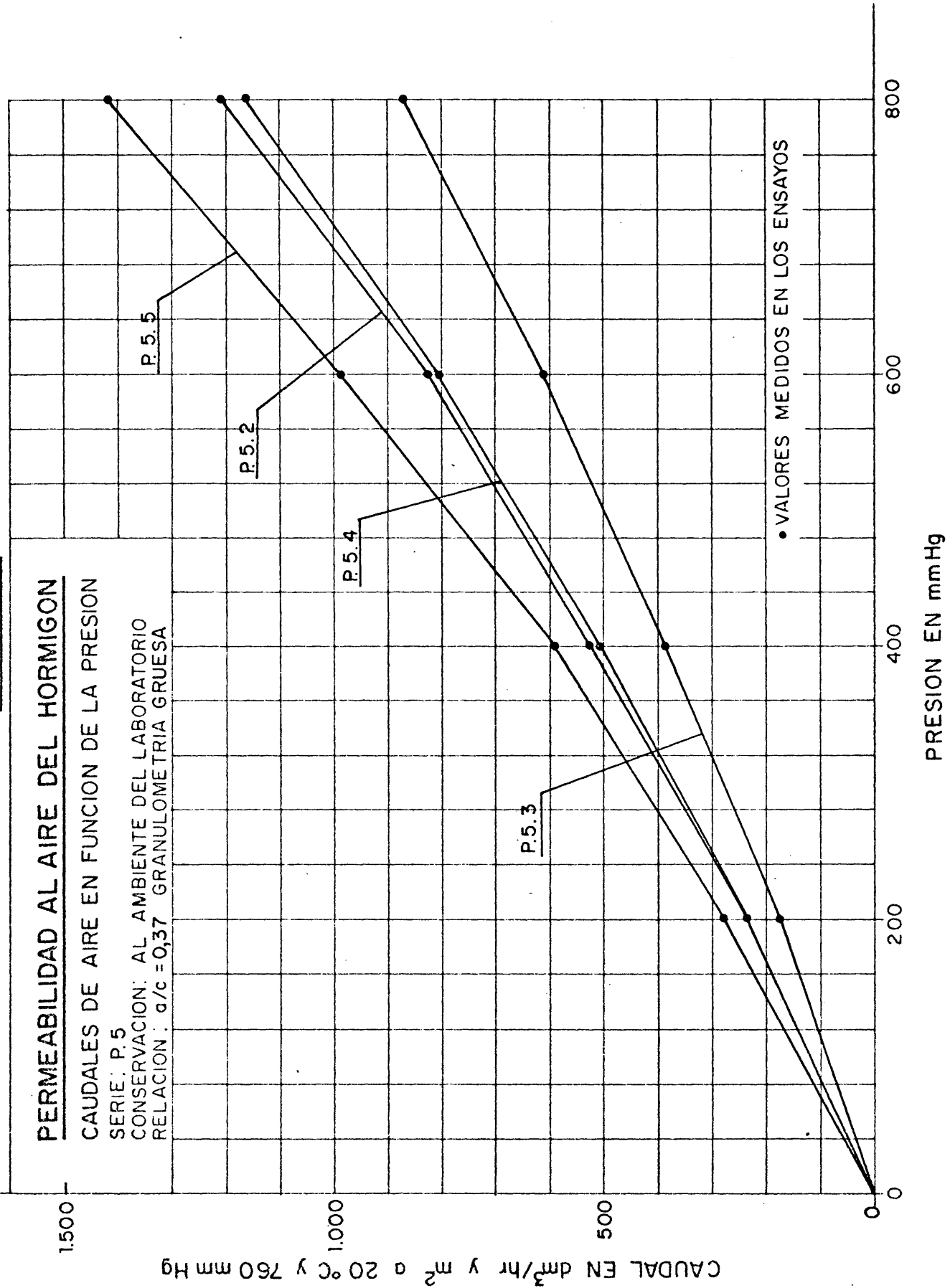


GRAFICO VI

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE P. 6

CONSERVACION: AL AMBIENTE DEL LABORATORIO

RELACION : $q/c = 0,42$ GRANULOMETRIA GRUESA

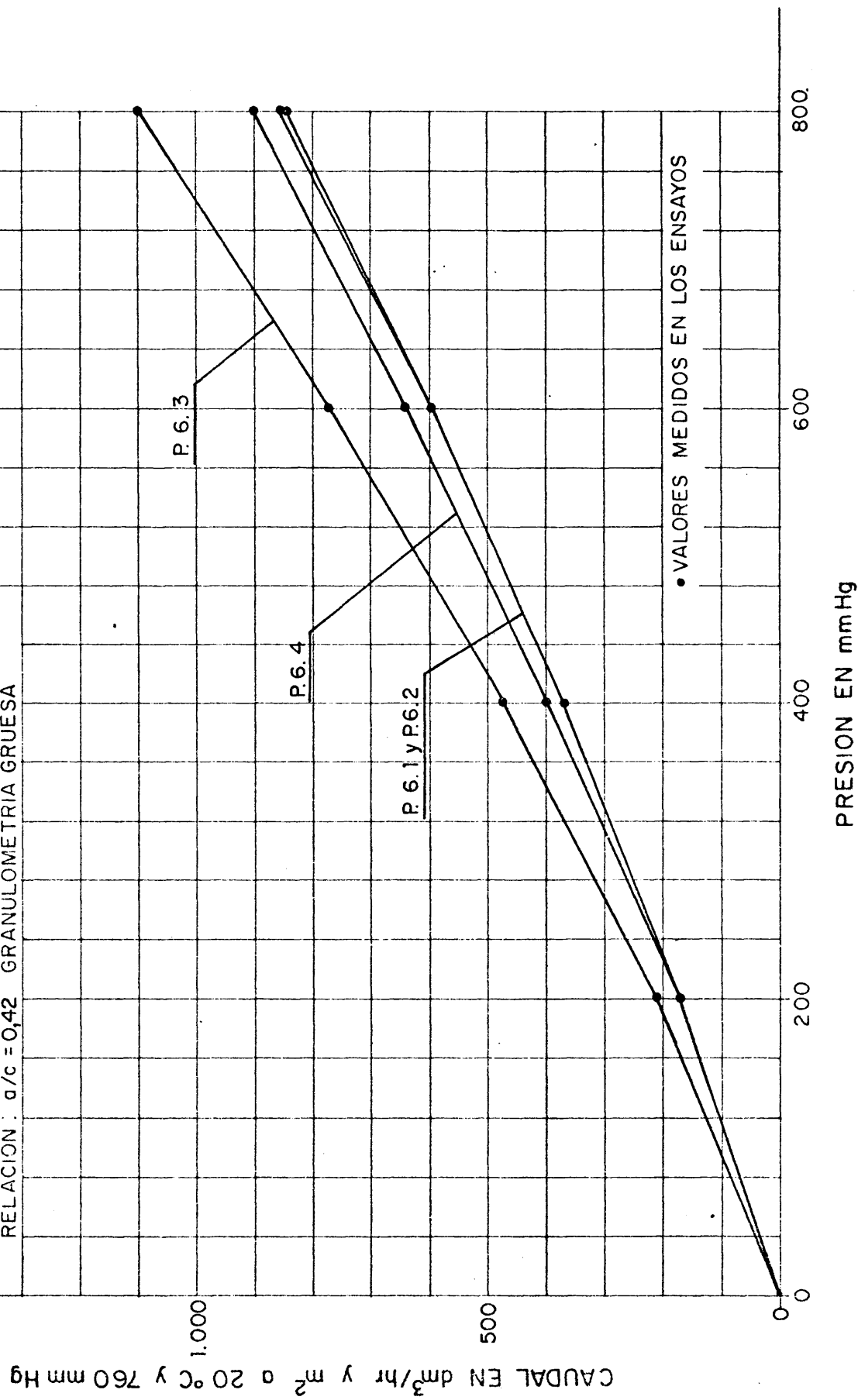


GRAFICO VII

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE P 7

CONSERVACION: AL AMBIENTE DEL LABORATORIO

RELACION: $a/c = 0,47$ GRANULOMETRIA GRUESA

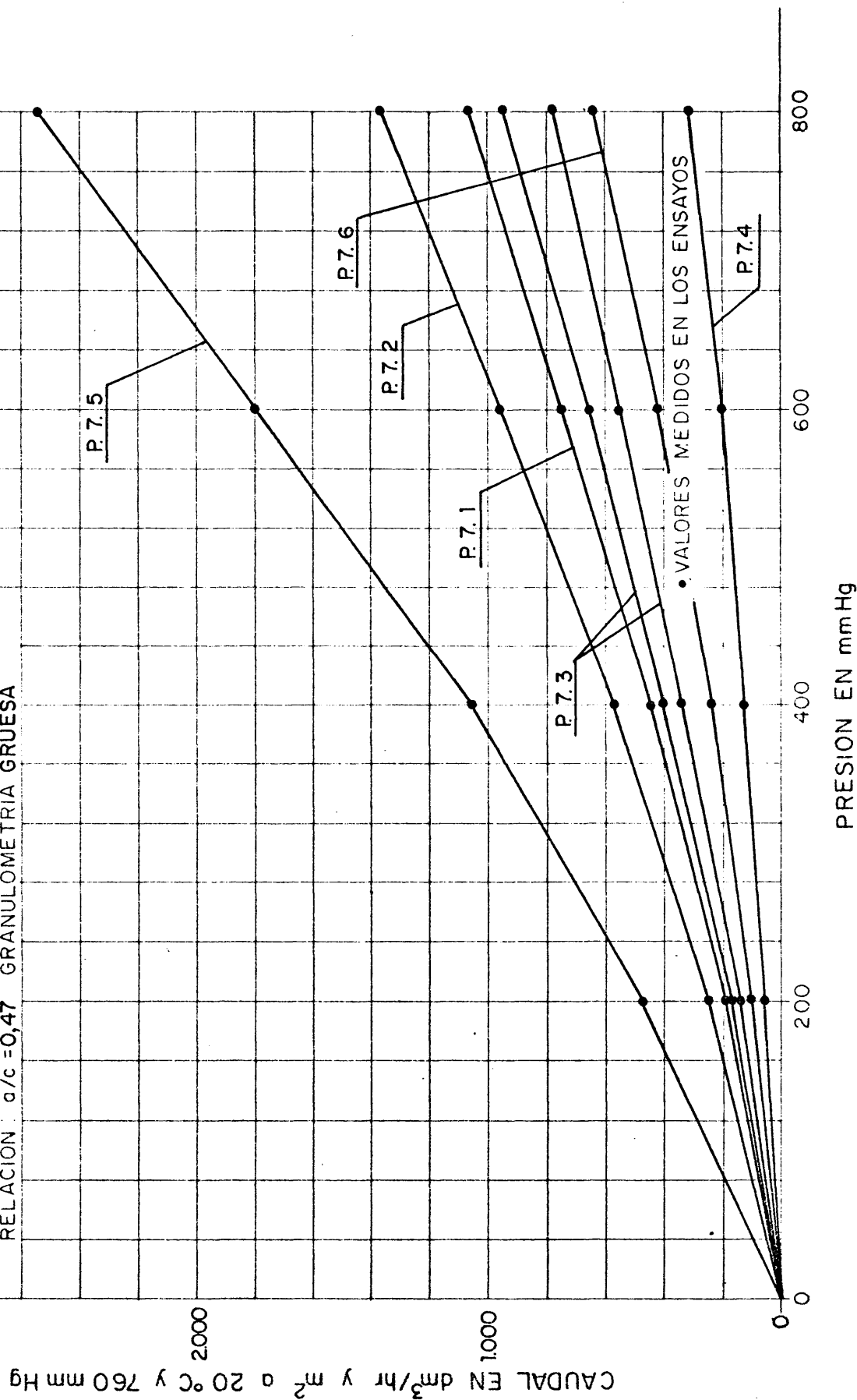


GRAFICO VIII

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.8

CONSERVACION: AL AMBIENTE DEL LABORATORIO

RELACION: $q/c = 0,52$ GRANULOMETRIA GRUESA

CAUDAL EN dm^3/hr y m^2 a $20^\circ C$ y 760 mm Hg

PRESION EN mmHg

• VALORES MEDIDOS EN LOS ENSAYOS

P.8.3

P.8.2

P.8.4

P.8.3

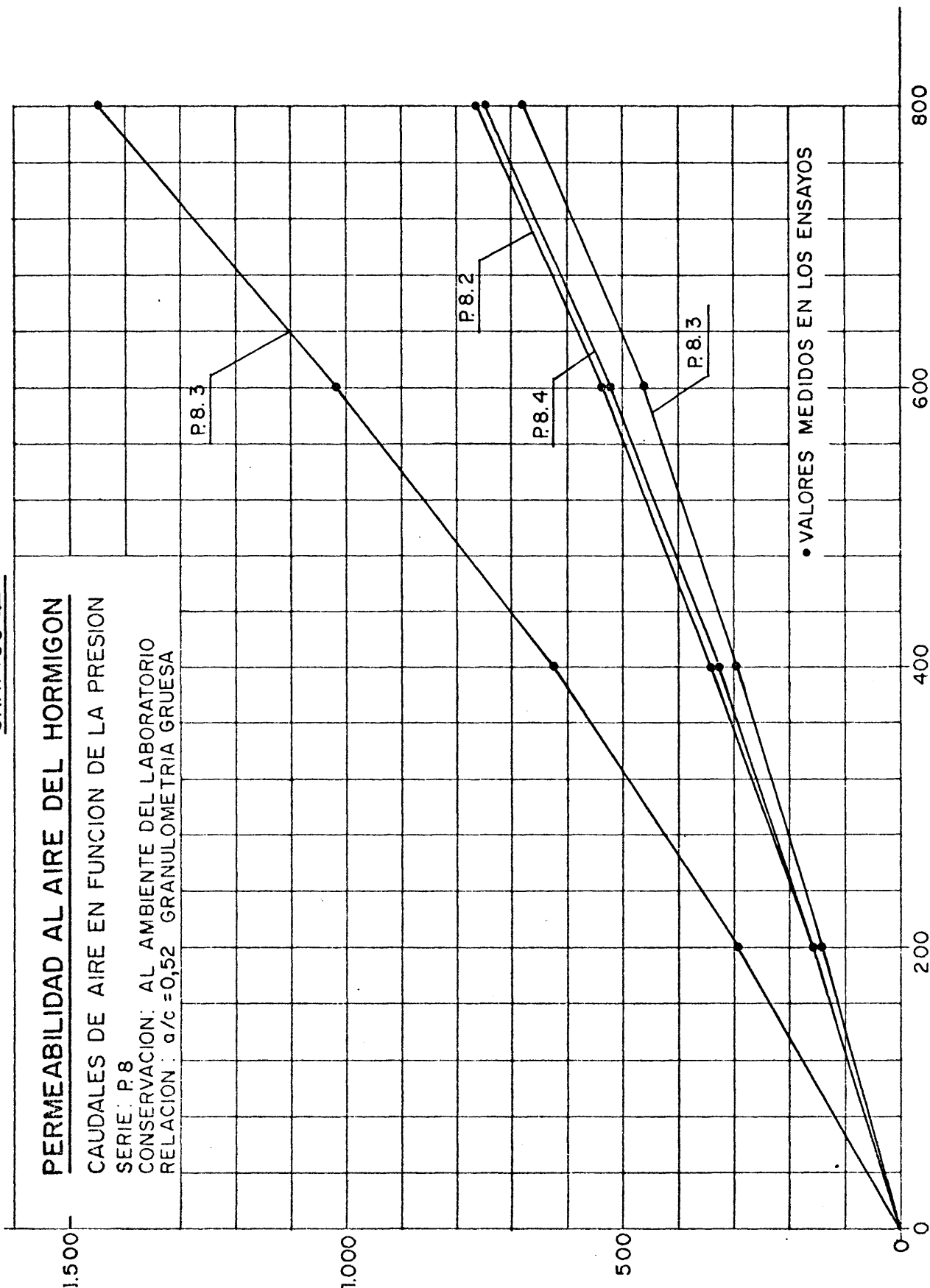


GRAFICO IX

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE P1

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 40 °C

RELACION: $\alpha/c = 0,37$ GRANULOMETRIA FINA

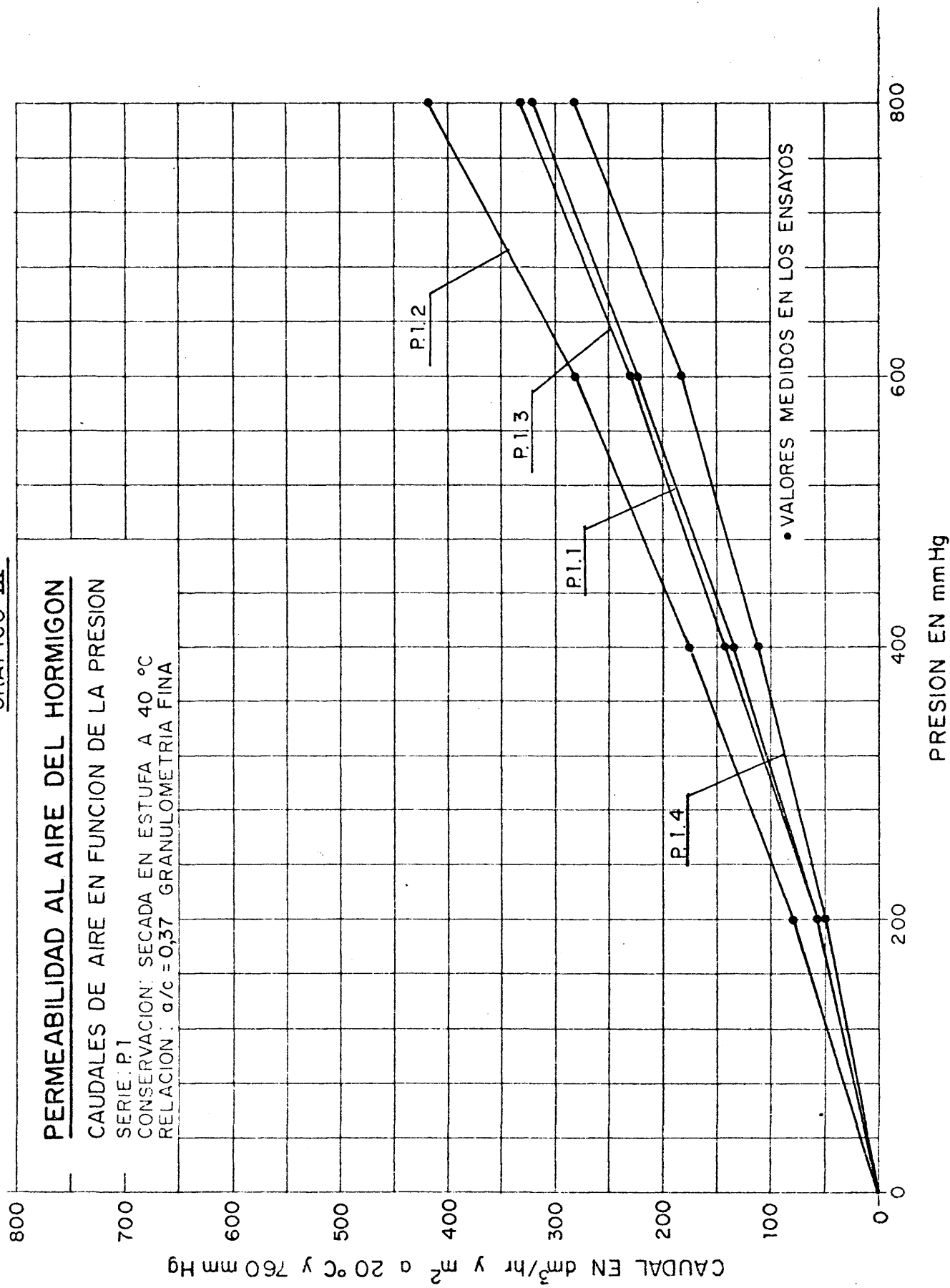


GRAFICO X

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.2

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 40 °C

RELACION: $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA FINA

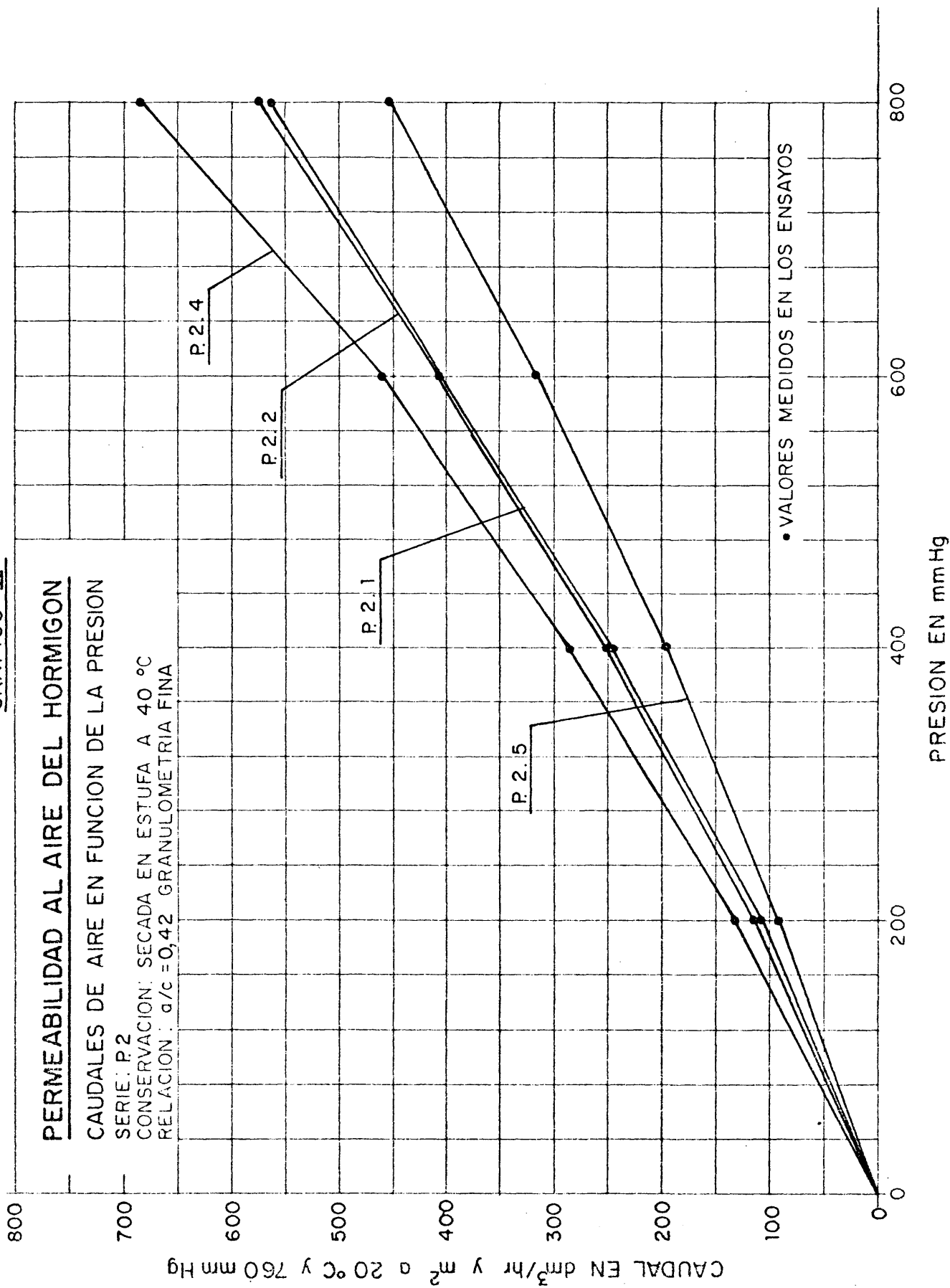


GRAFICO XI

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P. 3

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 40 °C

RELACION: $\alpha/c = 0,47$ GRANULOMETRIA FINA

CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a 20 °C y 760 mm Hg

PRESION EN mmHg

• VALORES MEDIDOS EN LOS ENSAYOS

P.3.2

P.3.1

P.3.3

P.3.4

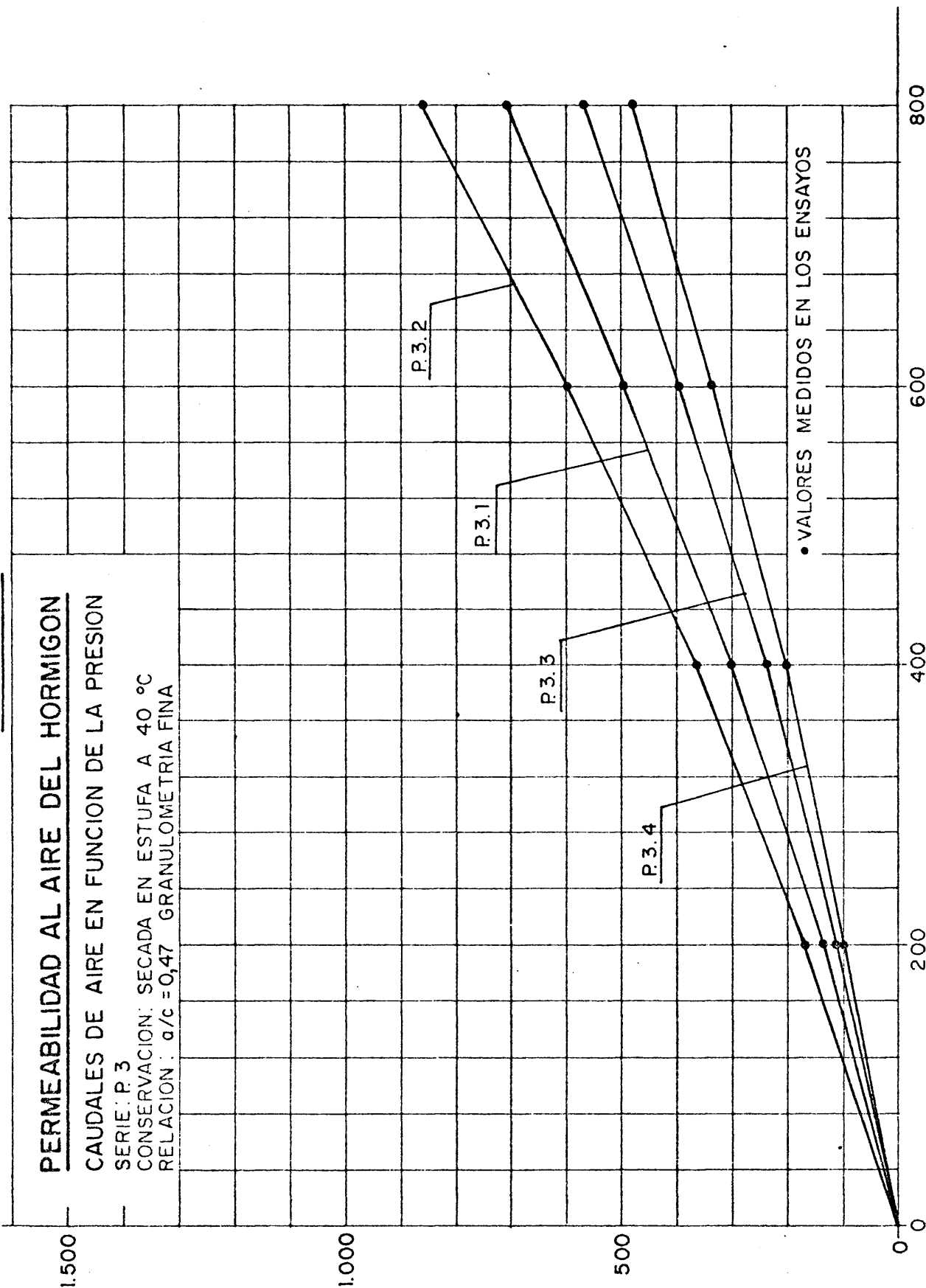


GRAFICO XII

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P. 4

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 40 °C

RELACION: $\alpha/c = 0,52$ GRANULOMETRIA FINA

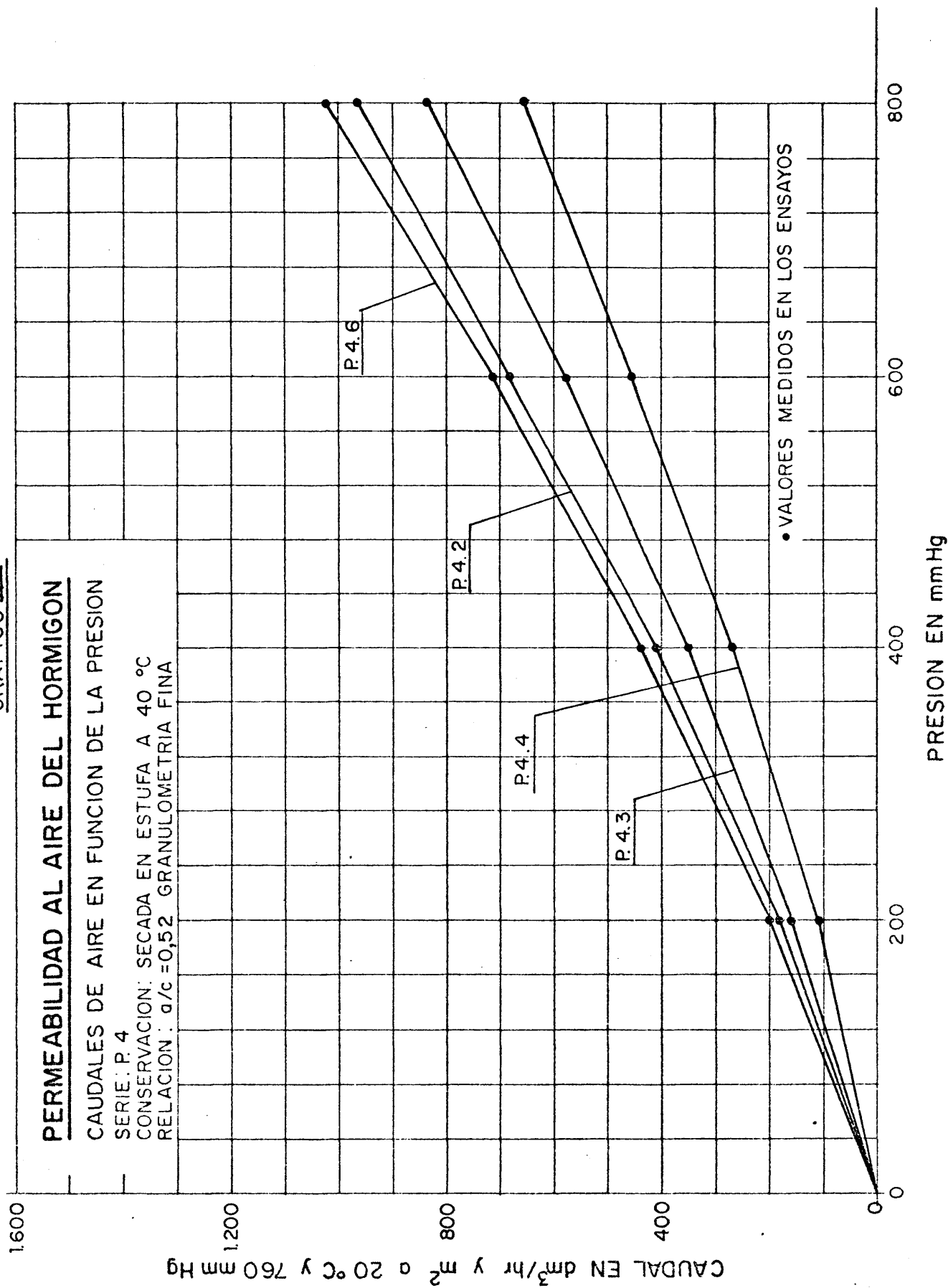


GRAFICO XIII

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.5

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 40 °C

RELACION: $g/c = 0.37$ GRANULOMETRIA GRUESA

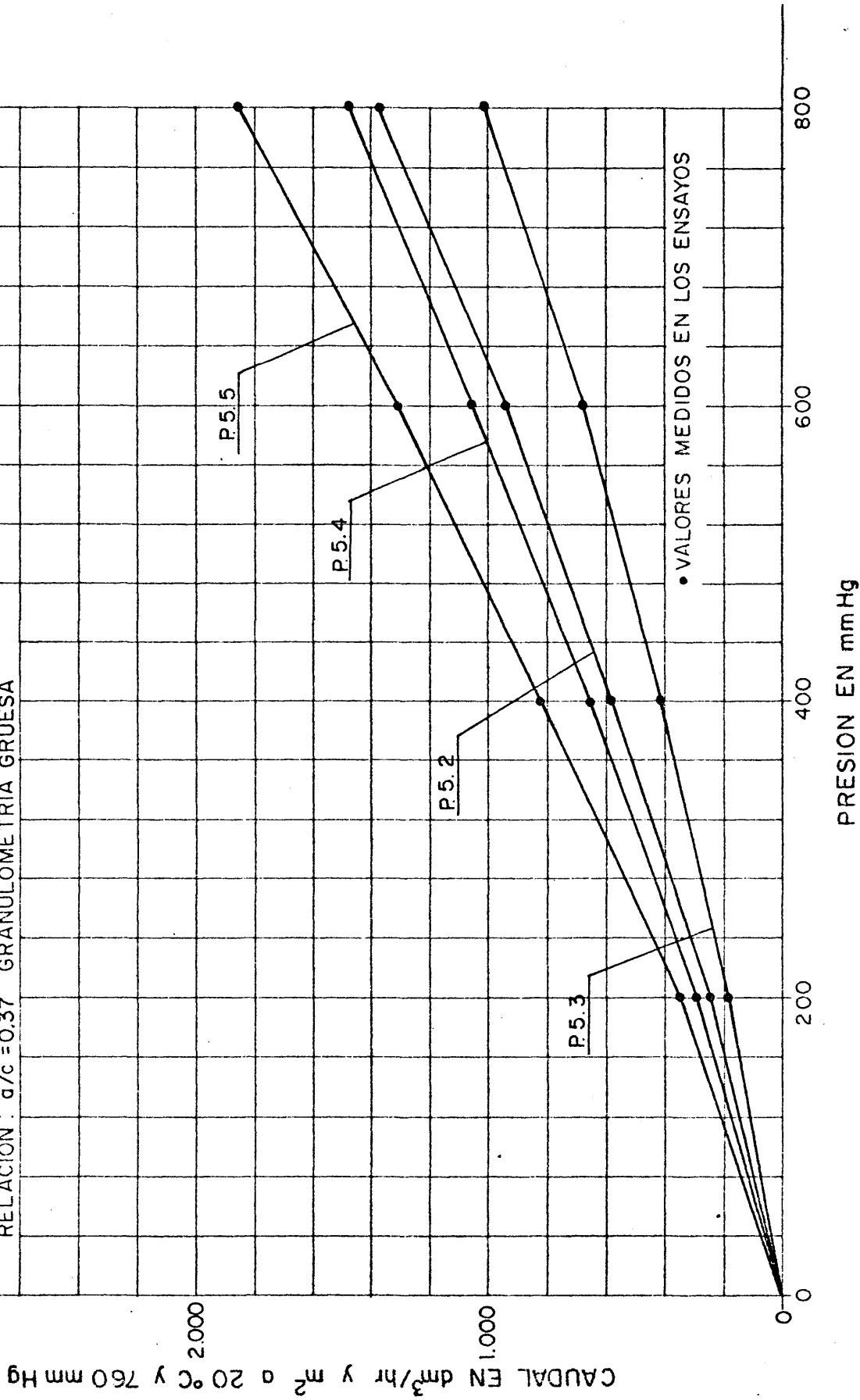


GRAFICO XIV

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.6

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 40 °C

RELACION: $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA GRUESA

CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a 20 °C y 760 mm Hg

PRESION EN mmHg

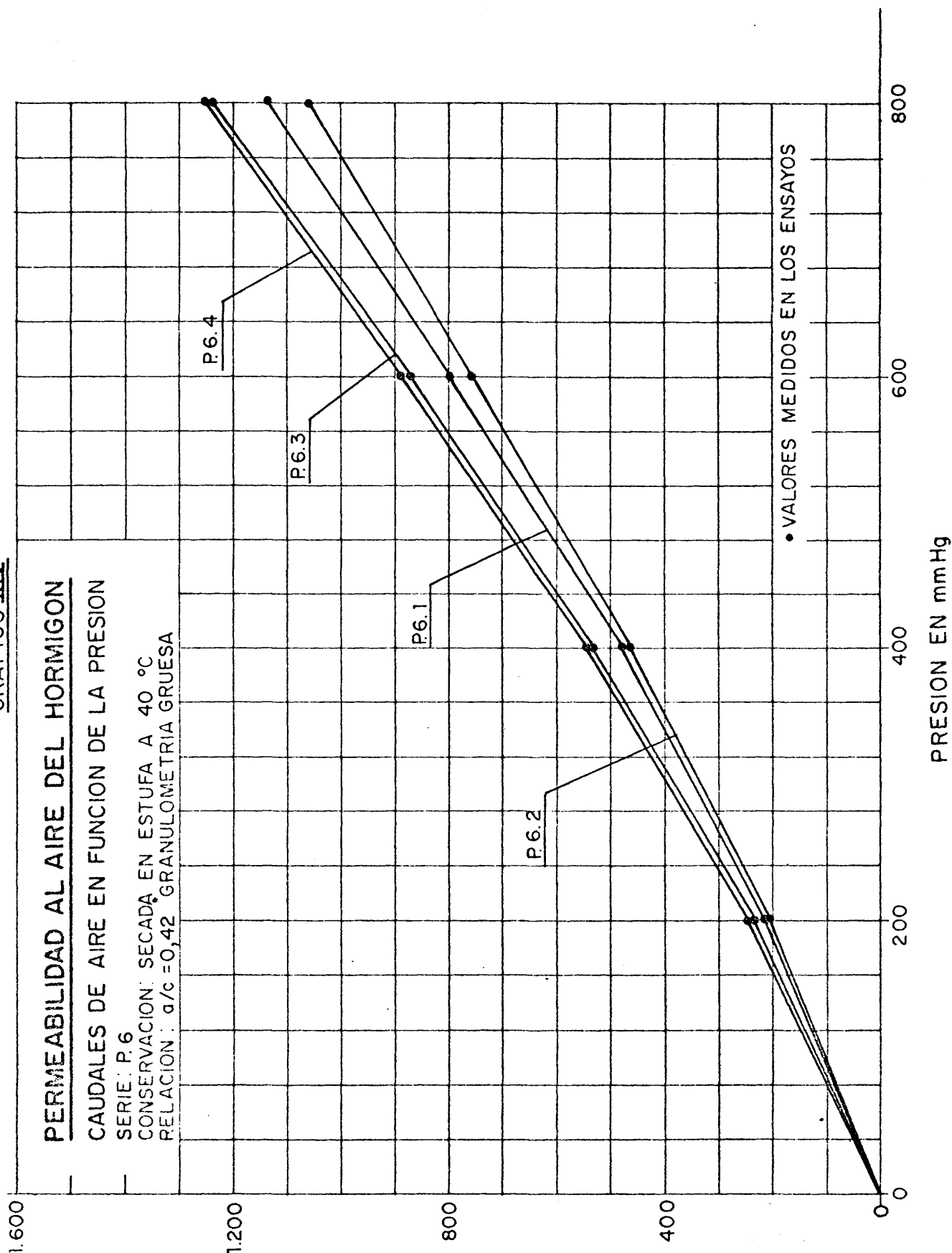


GRAFICO XV

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.7

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 40 °C

RELACION : $\alpha/c = 0,47$ GRANULOMETRIA GRUESA

CAUDAL EN dm^3/hr y m^2 a 20 °C y 760 mm Hg

PRESION EN mmHg

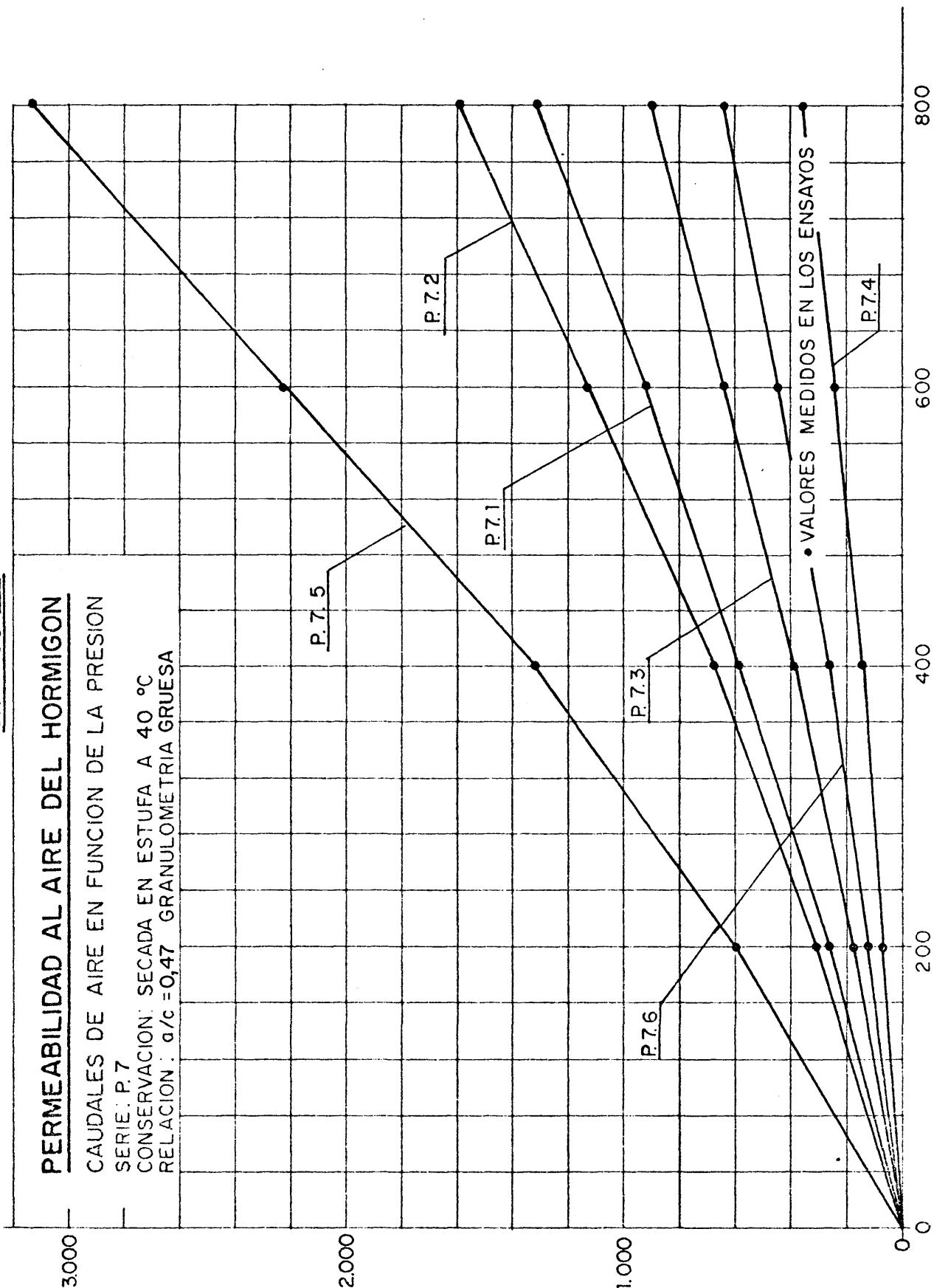


GRAFICO XVI

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P. 8

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 40 °C

RELACION: $\alpha/c = 0,52$ GRANULOMETRIA GRUESA

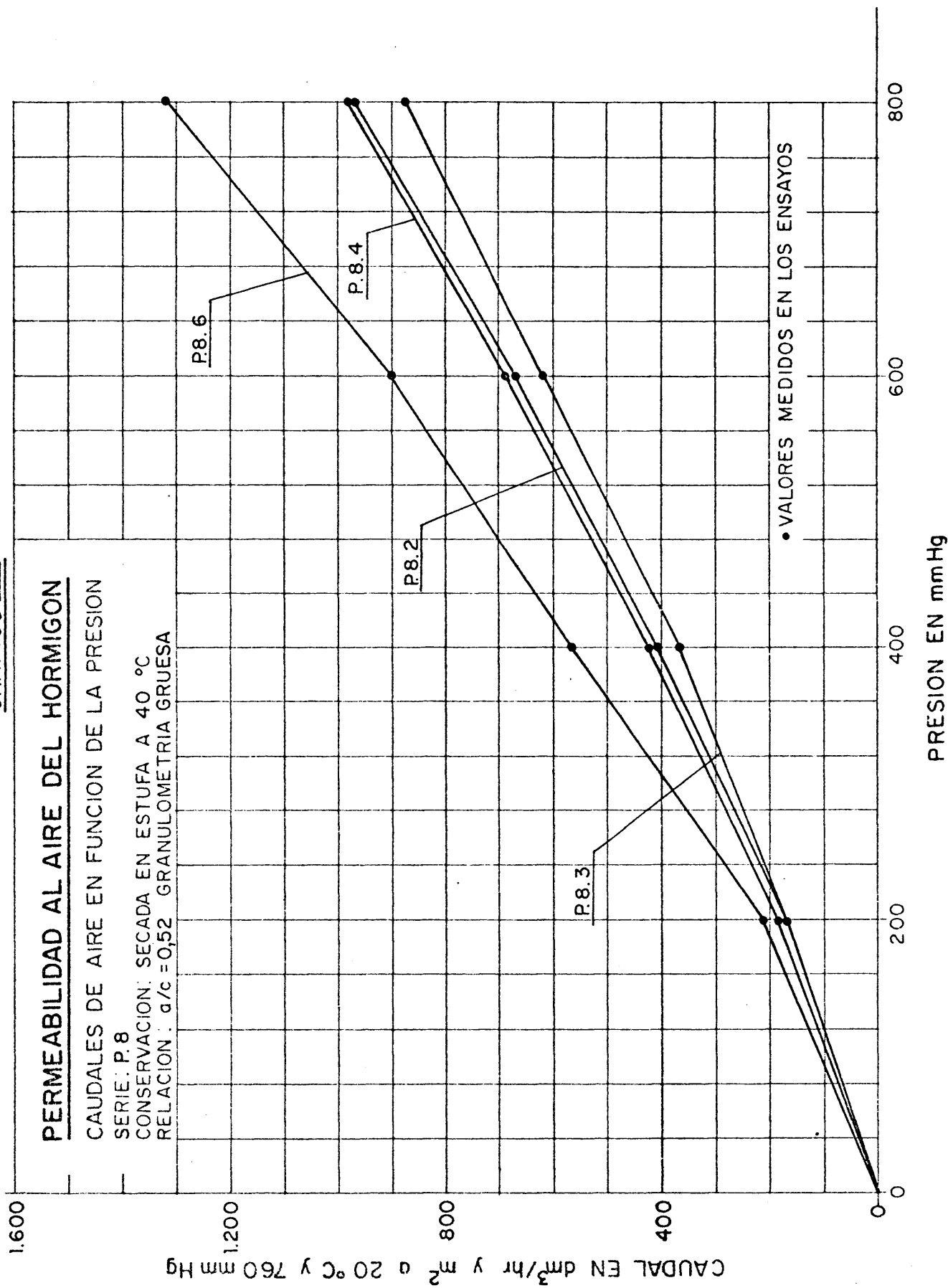


GRAFICO XVII

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.1

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 60 °C

RELACION: $g/c = 0,37$ GRANULOMETRIA FINA

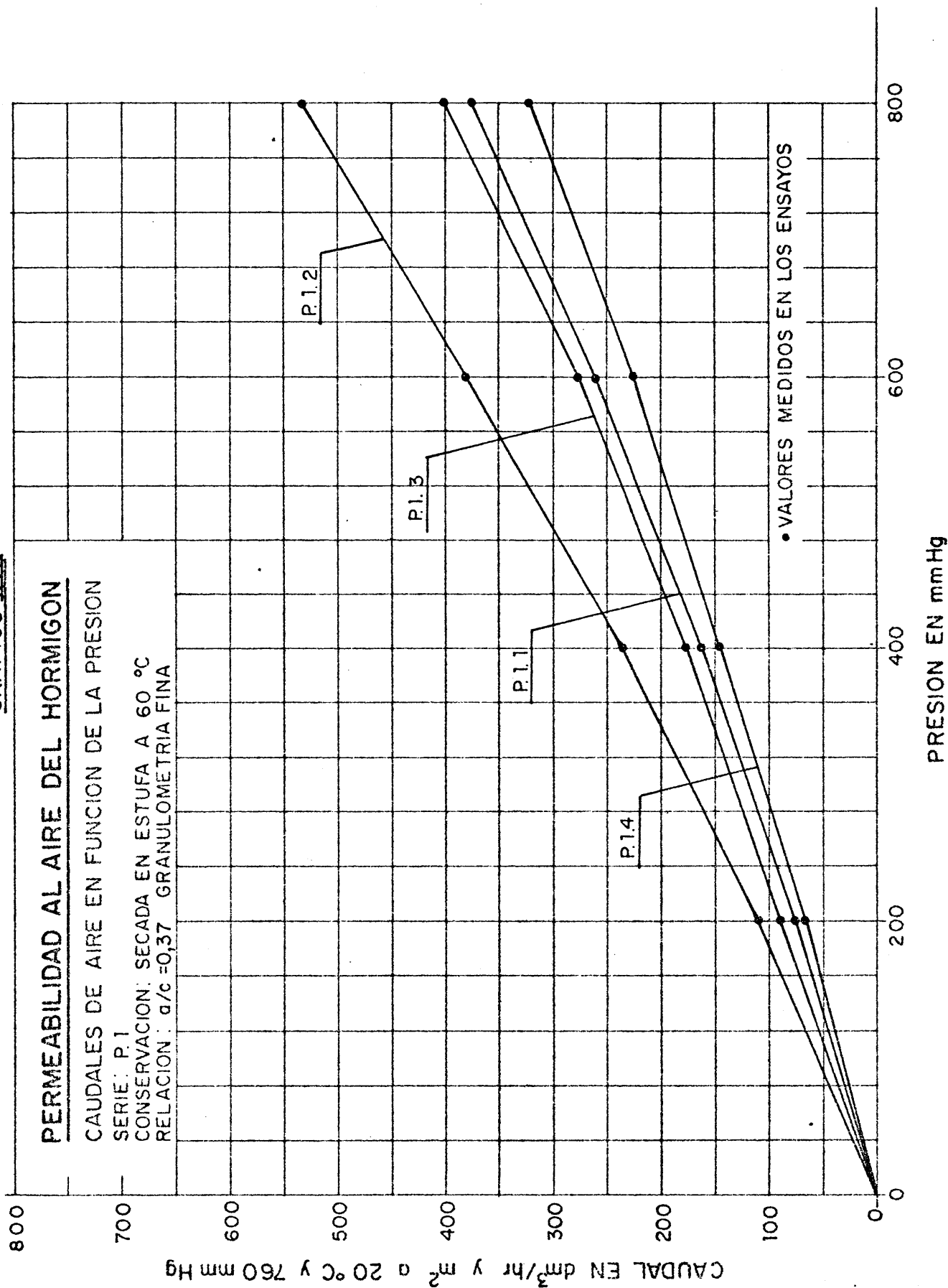


GRAFICO XVIII

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P. 2

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 60 °C

RELACION: $a/c = 0,37$ GRANULOMETRIA FINA

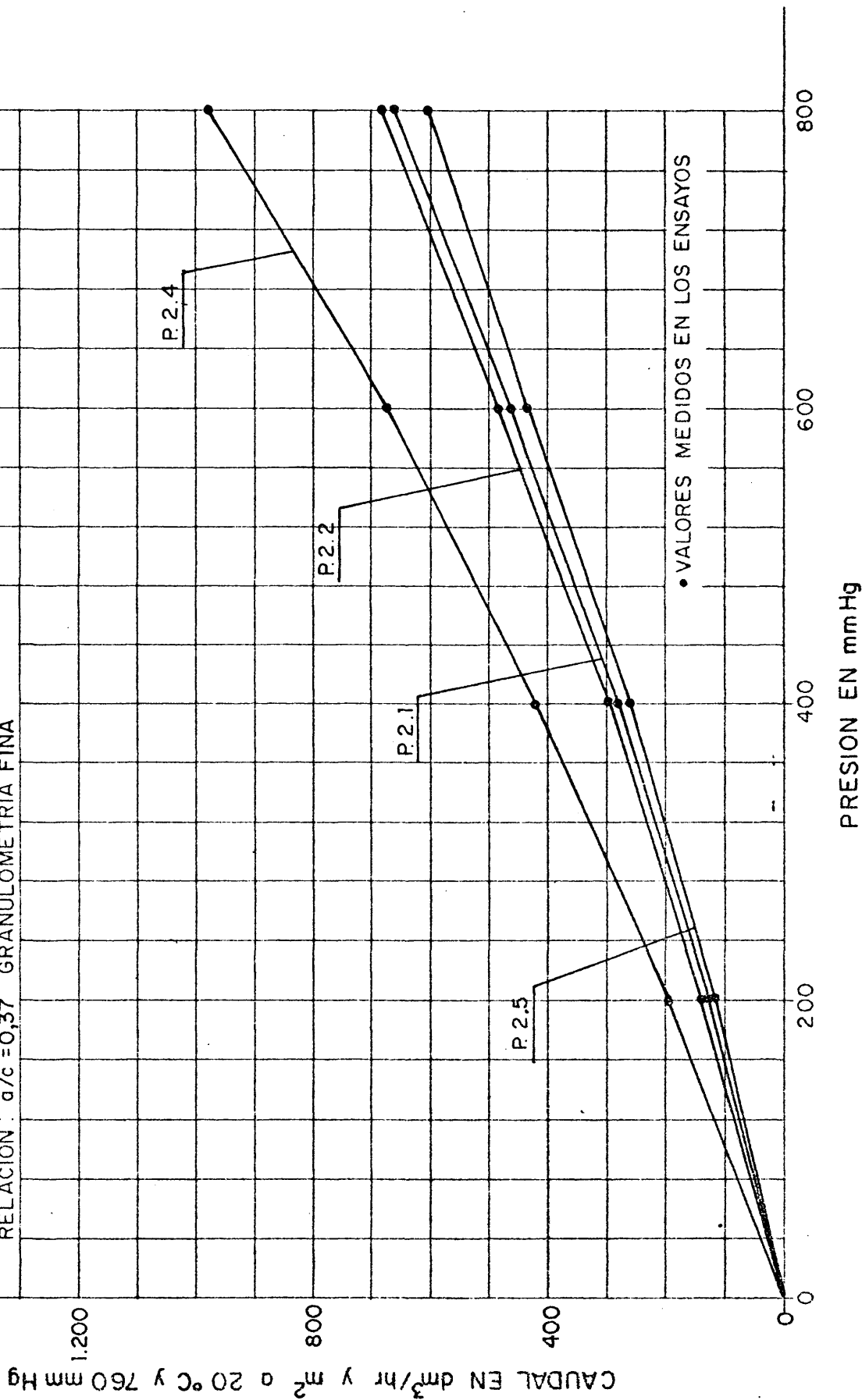


GRAFICO XIX

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE P 3

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 60 °C

RELACION : $q/c = 0,37$ GRANULOMETRIA FINA

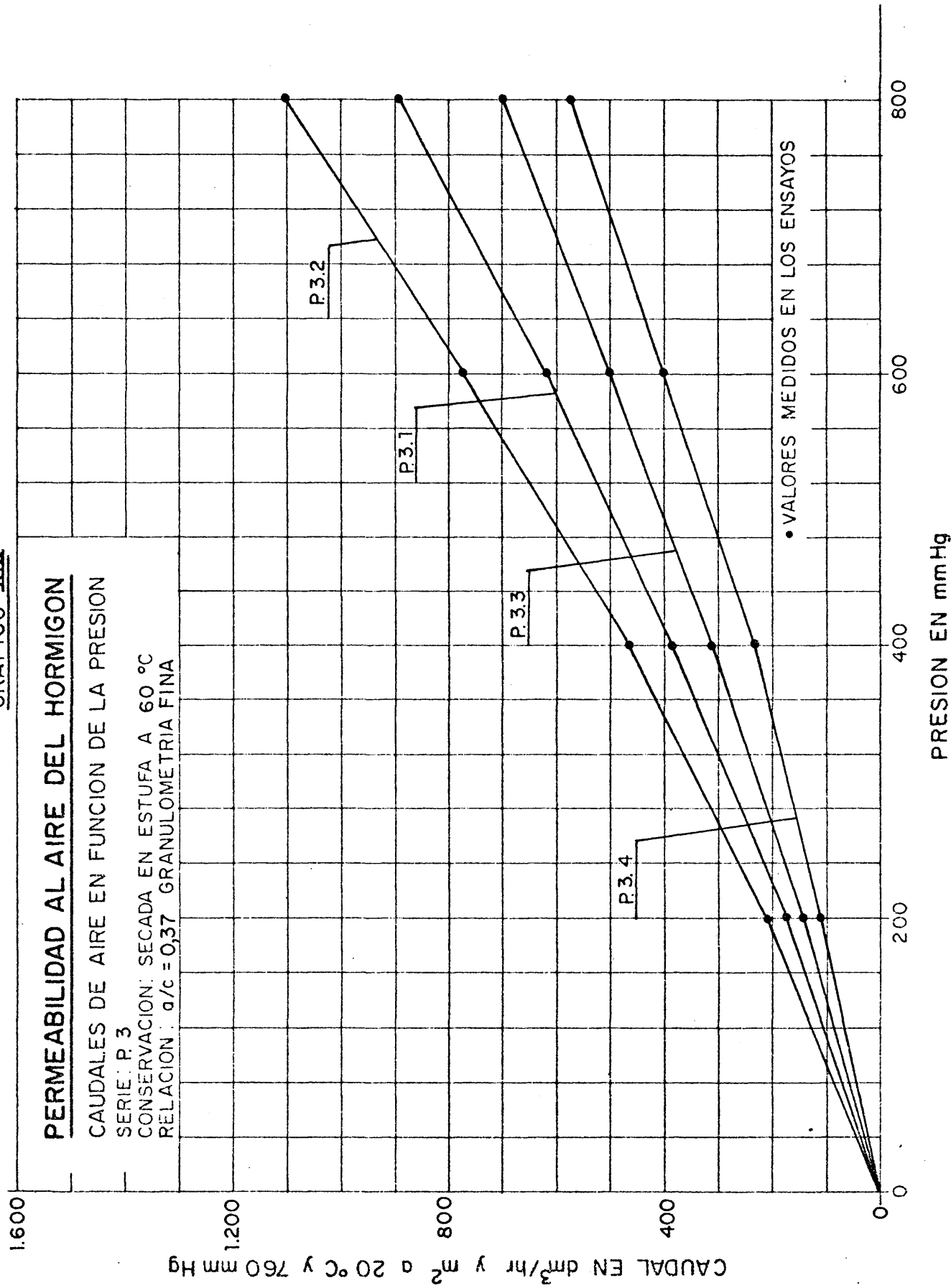


GRAFICO XX

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.4

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 60 °C

RELACION: $q/c = 0,37$ GRANULOMETRIA FINA

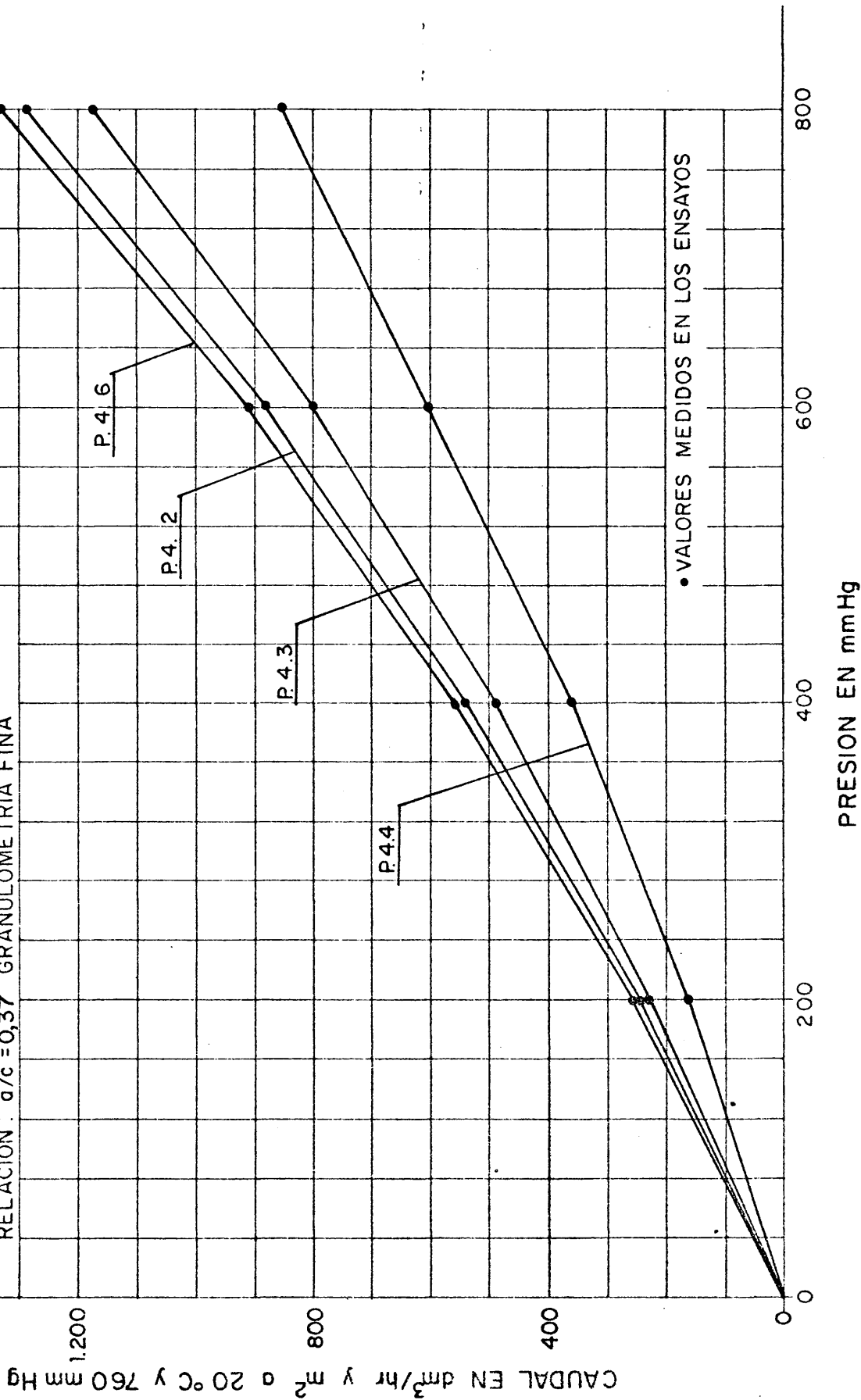


GRAFICO XXI

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P. 5

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 60 °C

RELACION : $q/c = 0,37$ GRANULOMETRIA FINA

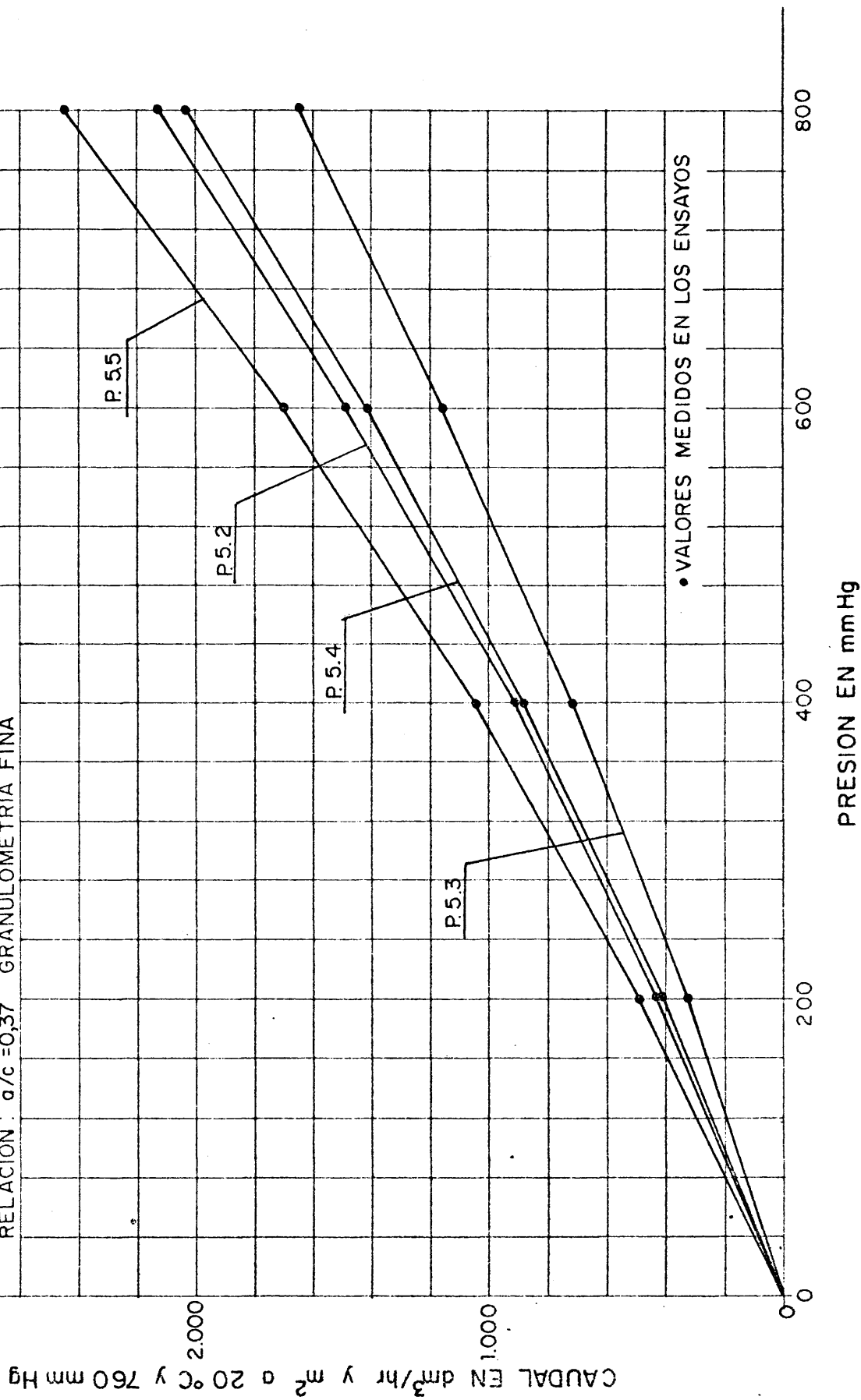


GRAFICO XXII

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.6

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 60 °C

RELACION : $\alpha/c = 0,37$ GRANULOMETRIA FINA

CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a 20 °C y 760 mm Hg

PRESION EN mmHg

• VALORES MEDIDOS EN LOS ENSAYOS

P.6.3

P.6.4

P.6.2

P.6.1

3.000

2.000

1.000

0

200

400

600

800

GRAFICO XXIII

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE P.7

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 60 °C

RELACION: $\alpha/c = 0,47$ GRANULOMETRIA GRUESA

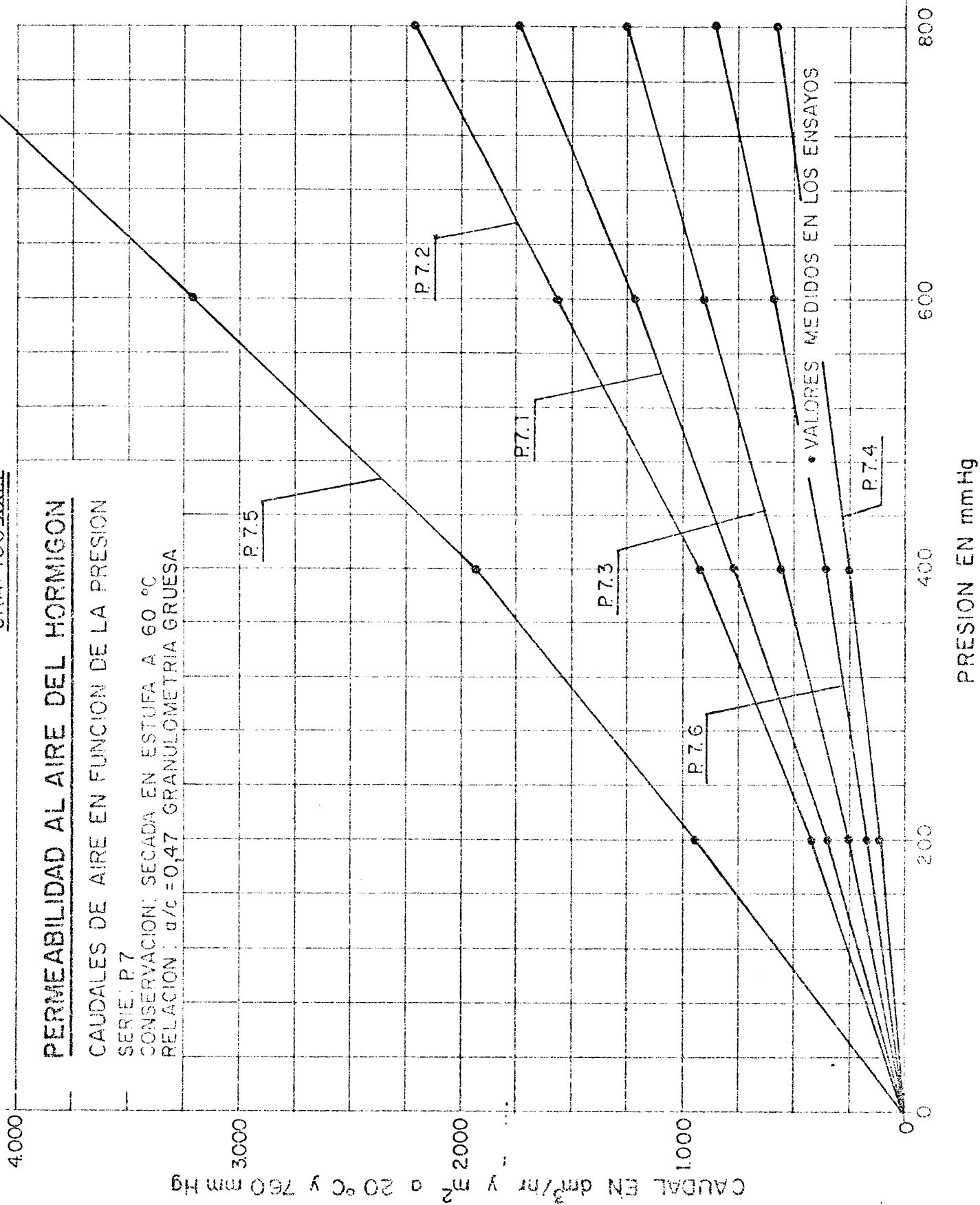


GRAFICO XXIV

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P. 8

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 60 °C

RELACION: $g/c = 0,52$ GRANULOMETRIA GRUESA

CAUDAL EN dm^3/hr y m^2 a 20 °C y 760 mm Hg

PRESION EN mmHg

• VALORES MEDIDOS EN LOS ENSAYOS

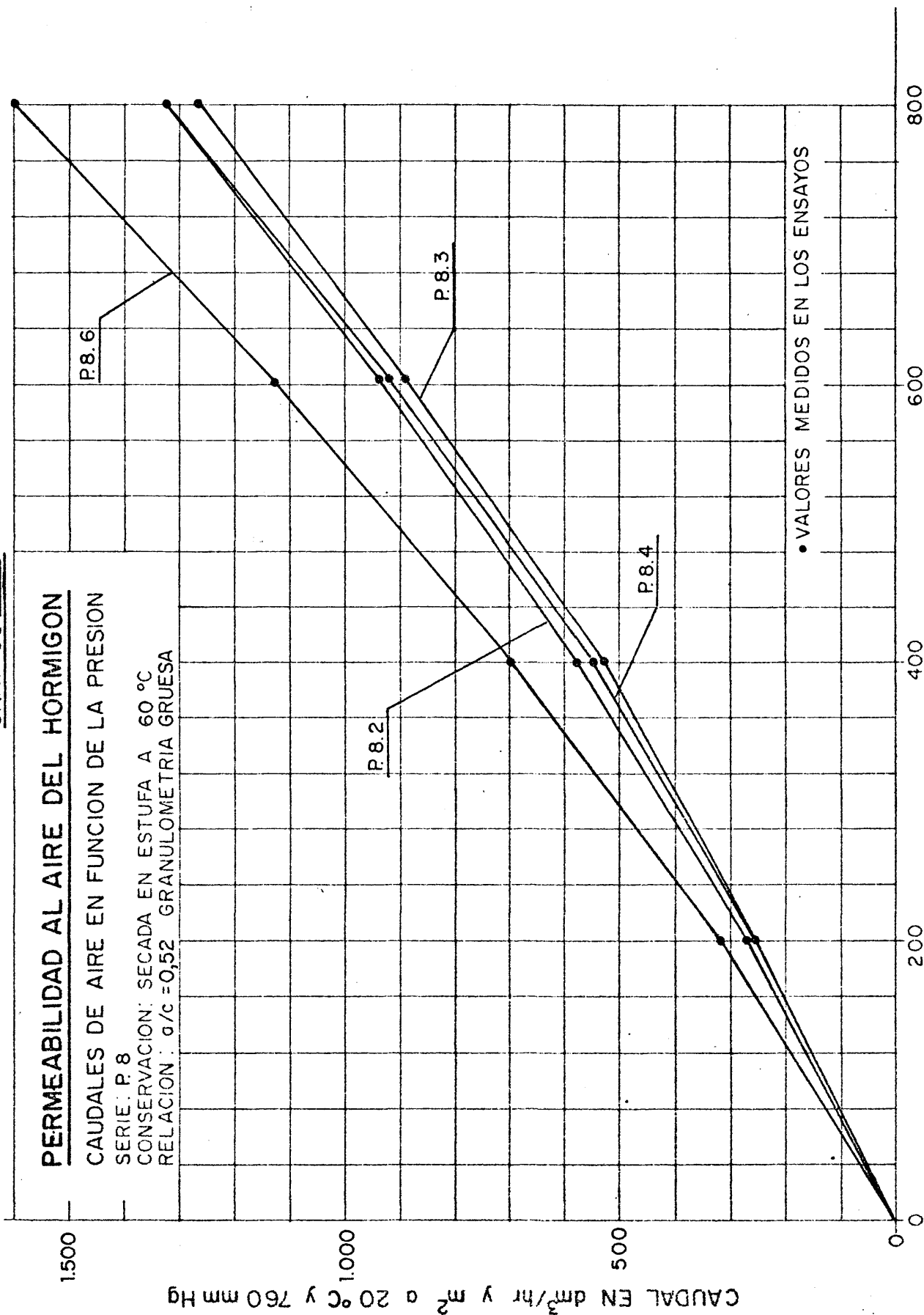


GRAFICO XXV

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

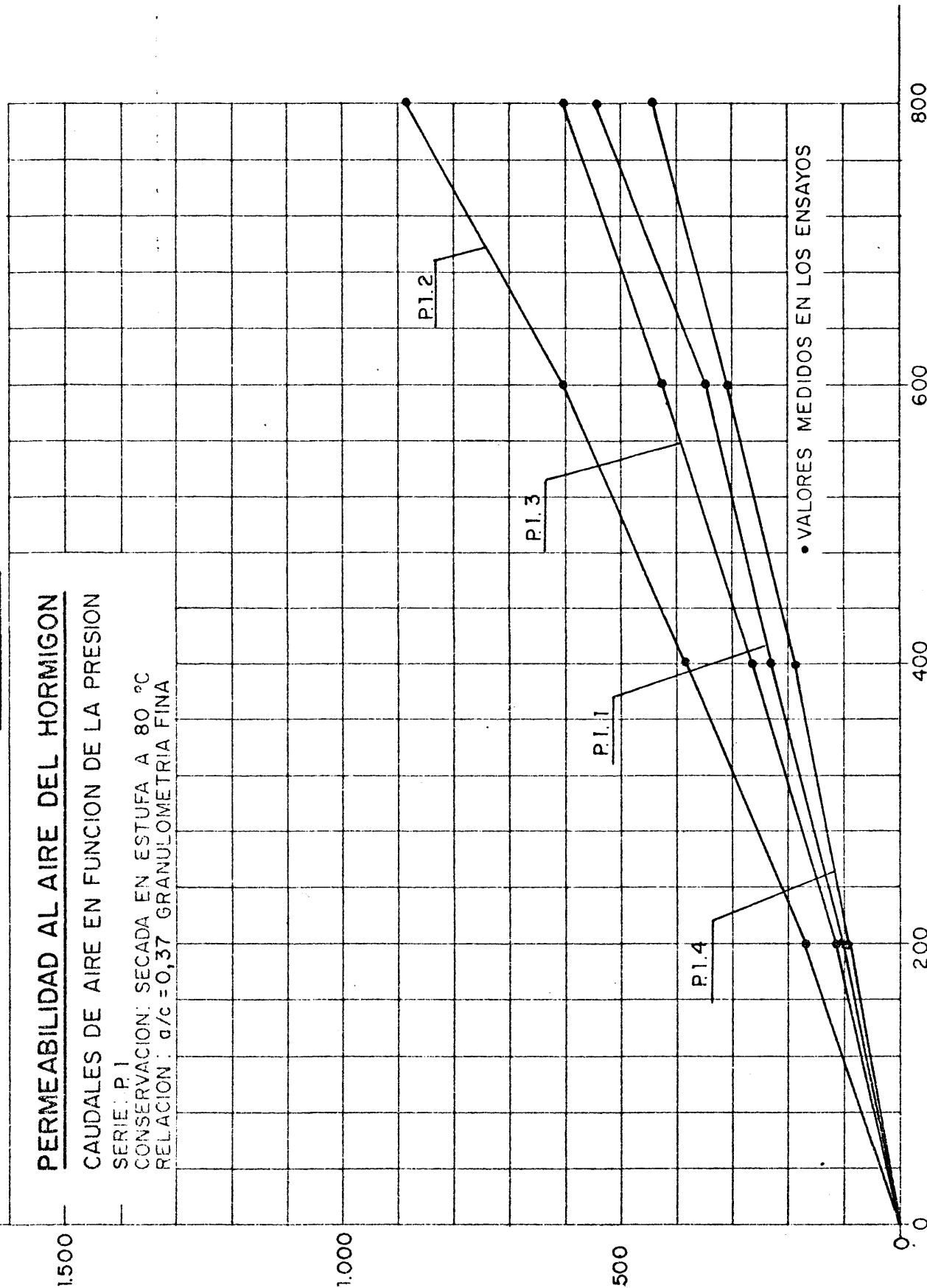
SERIE: P.1

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 80 °C

RELACION: $q/c = 0,37$ GRANULOMETRIA FINA

CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a 20 °C y 760 mm Hg

PRESION EN mmHg



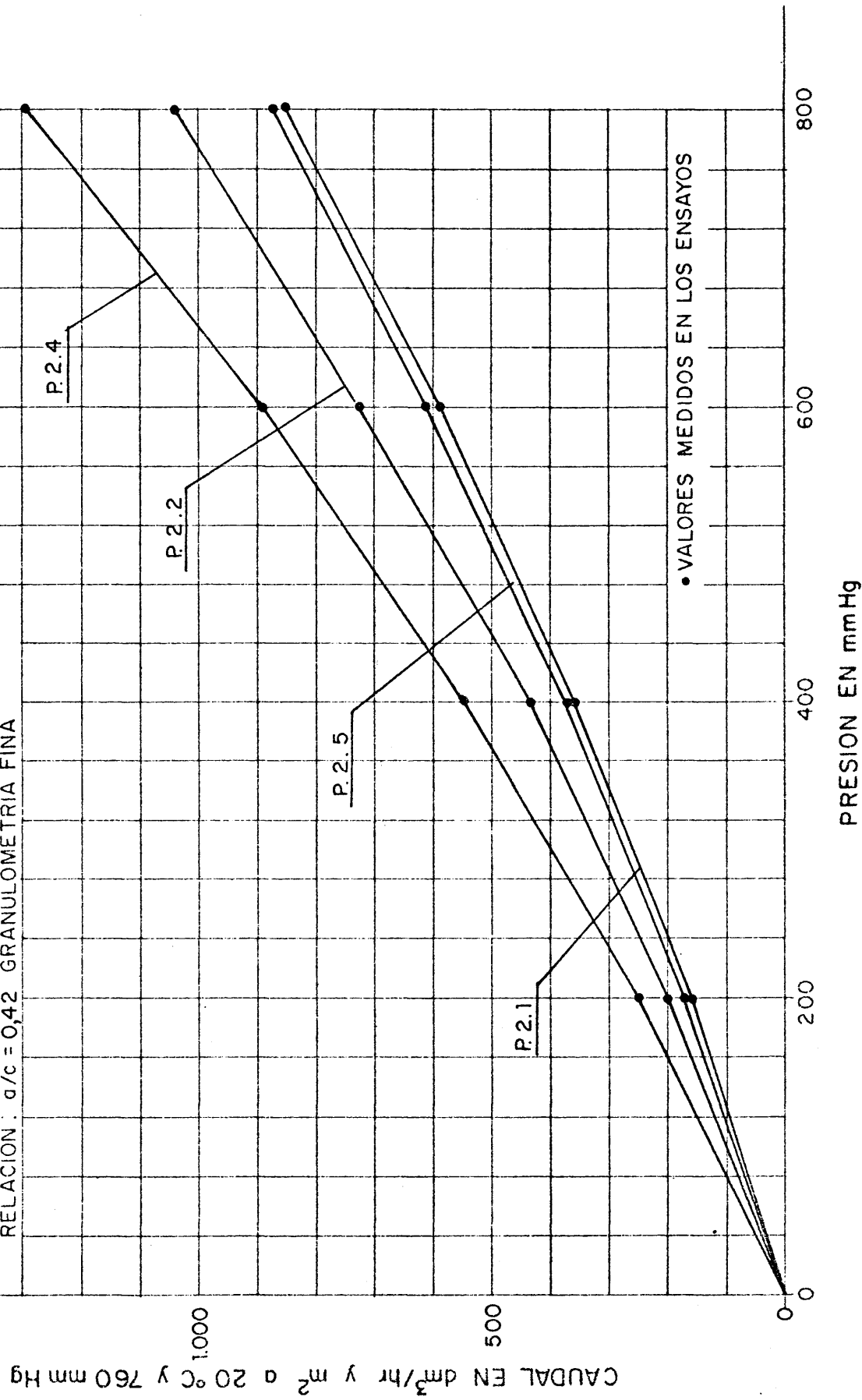
PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P. 2

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 80 °C

RELACION: $a/c = 0,42$ GRANULOMETRIA FINA



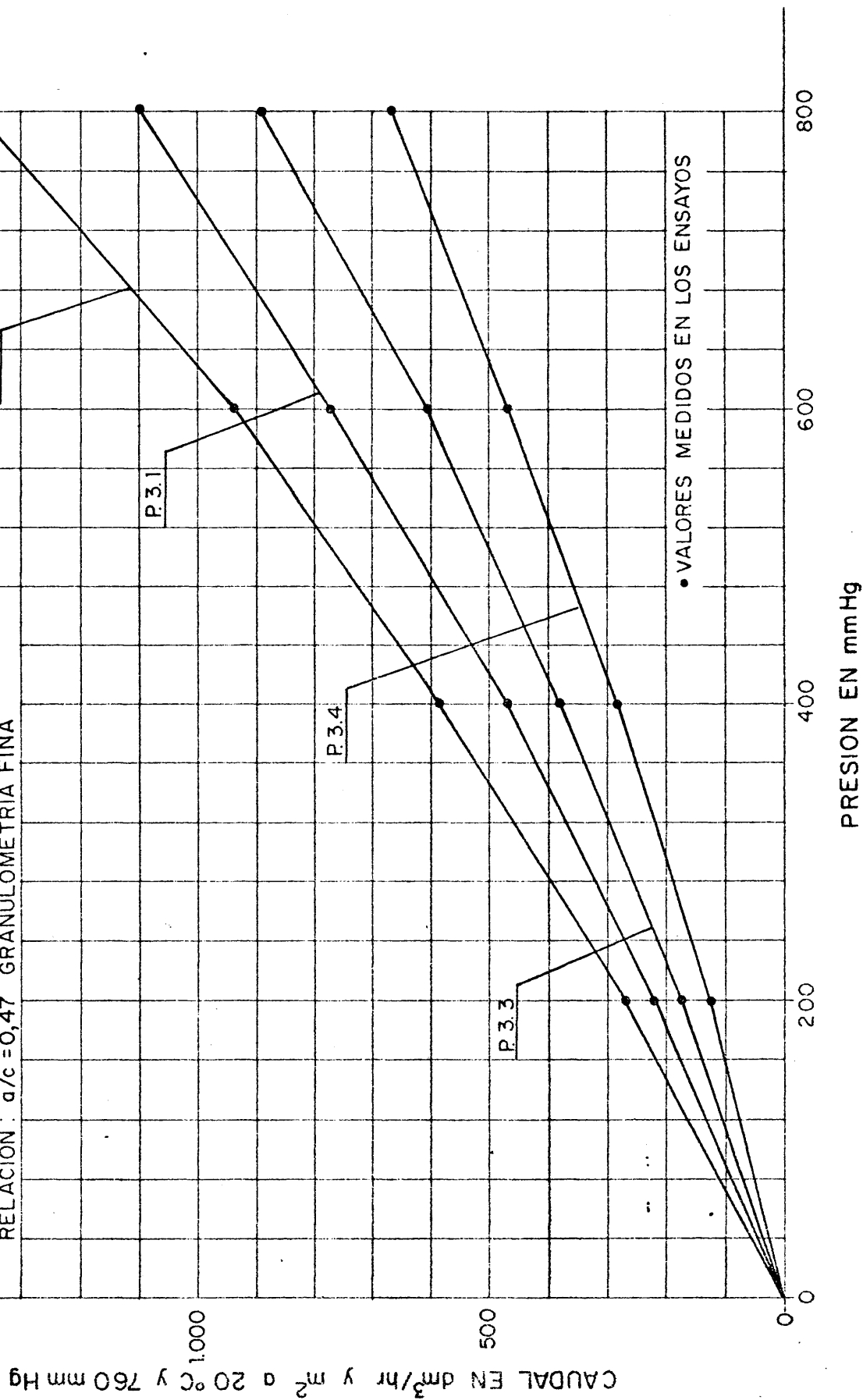
PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P. 3

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 80 °C

RELACION: $q/c = 0,47$ GRANULOMETRIA FINA



PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.4

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 80 °C

RELACION: $\alpha/c = 0,52$ GRANULOMETRIA FINA

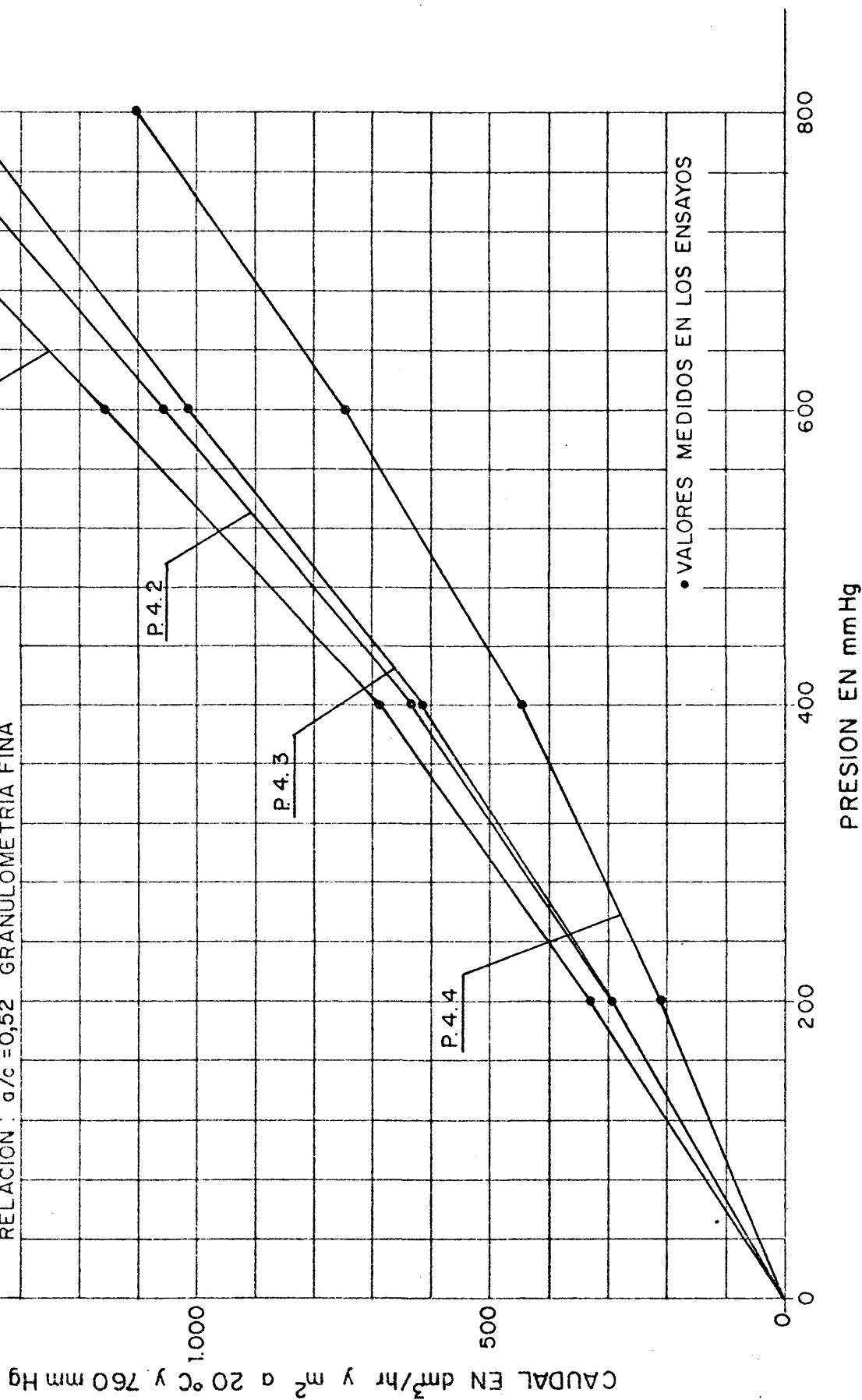


GRAFICO XXIX

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE P.5

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 80 °C

RELACION : $q/c = 0,37$ GRANULOMETRIA GRUESA

3000

CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a 20 °C y 760 mm Hg

2000

1000

0

P.5.5

P.5.4

P.5.2

P.5.3

• VALORES MEDIDOS EN LOS ENSAYOS

200

400

600

800

PRESION EN mmHg

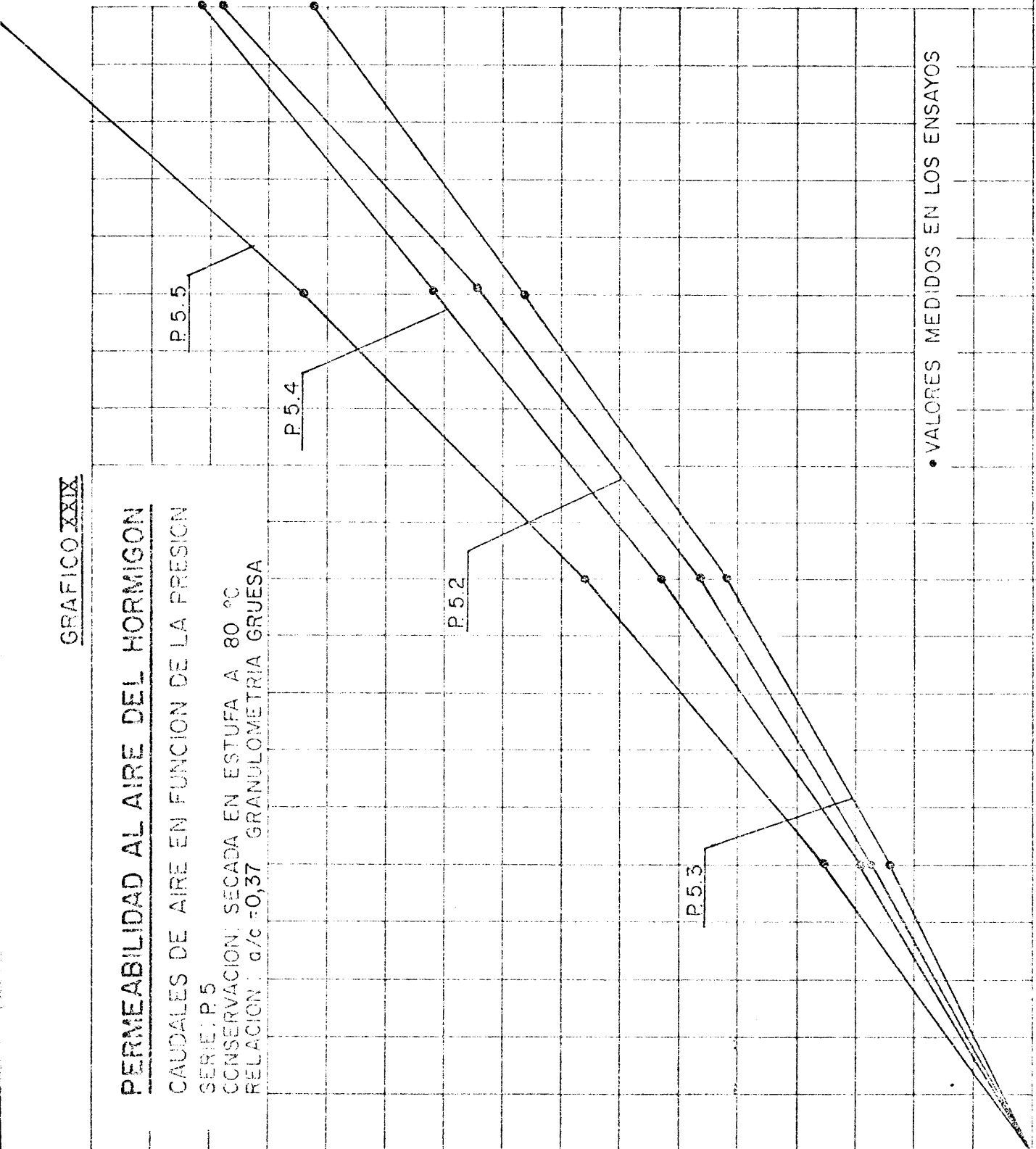


GRAFICO ~~XXX~~

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.6

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 80 °C

RELACION: $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA GRUESA

CAUDAL EN dm^3/hr y m^2 a 20 °C y 760 mm Hg

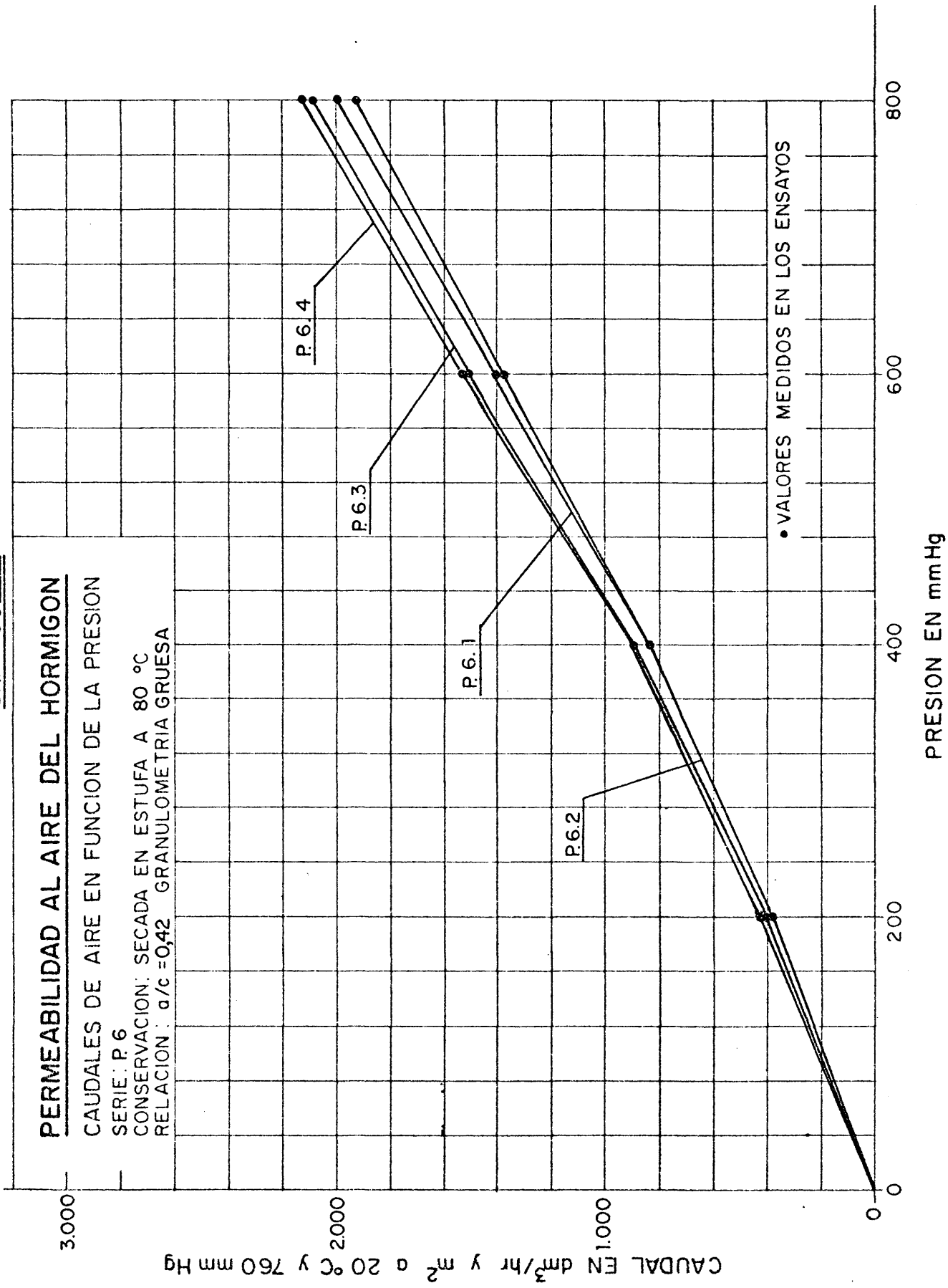


GRAFICO XXXI

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE P 7

CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 80 °C

RELACION: $\alpha/c = 0,47$ GRANULOMETRIA GRUESA

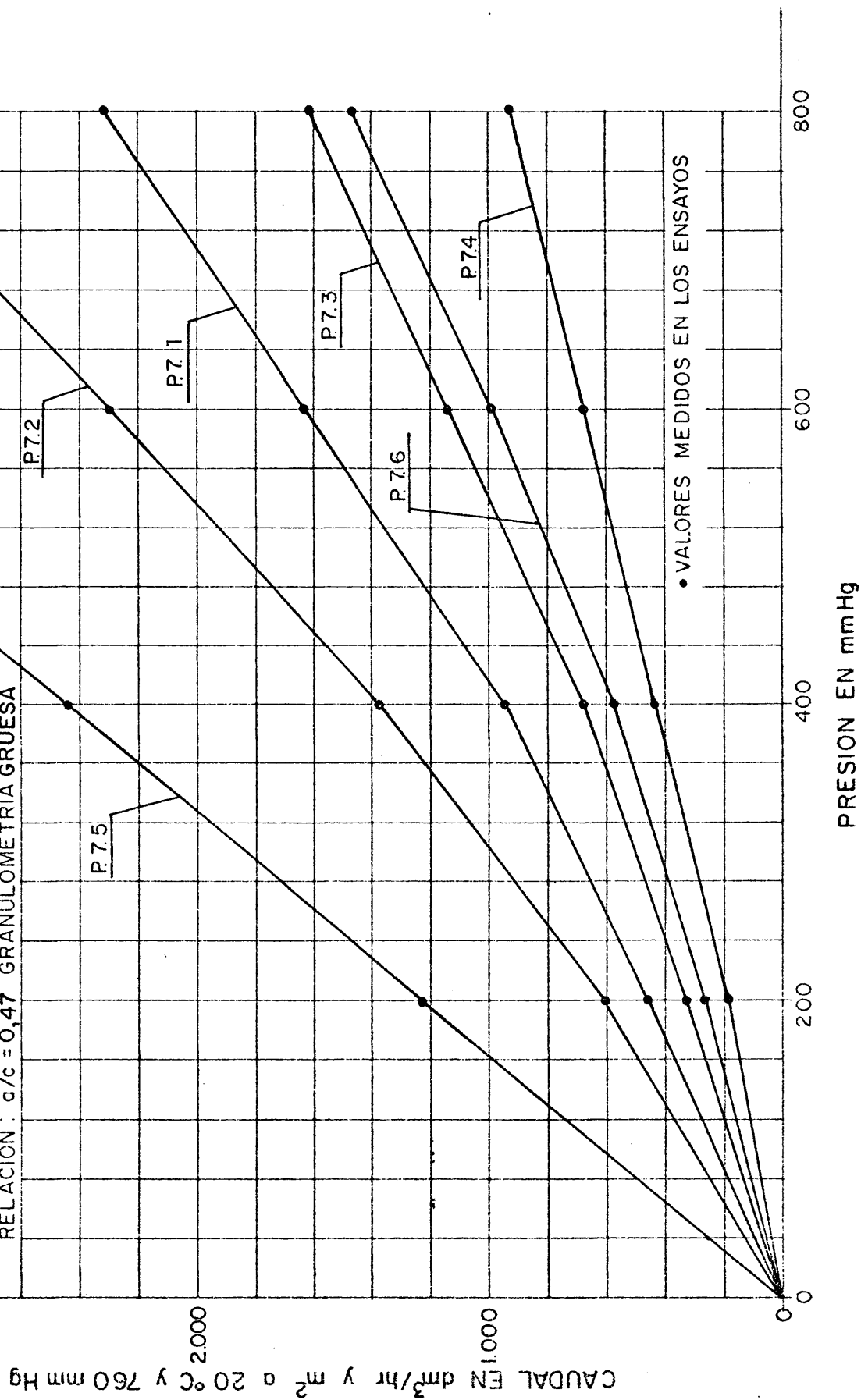


GRAFICO XXXII

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.8

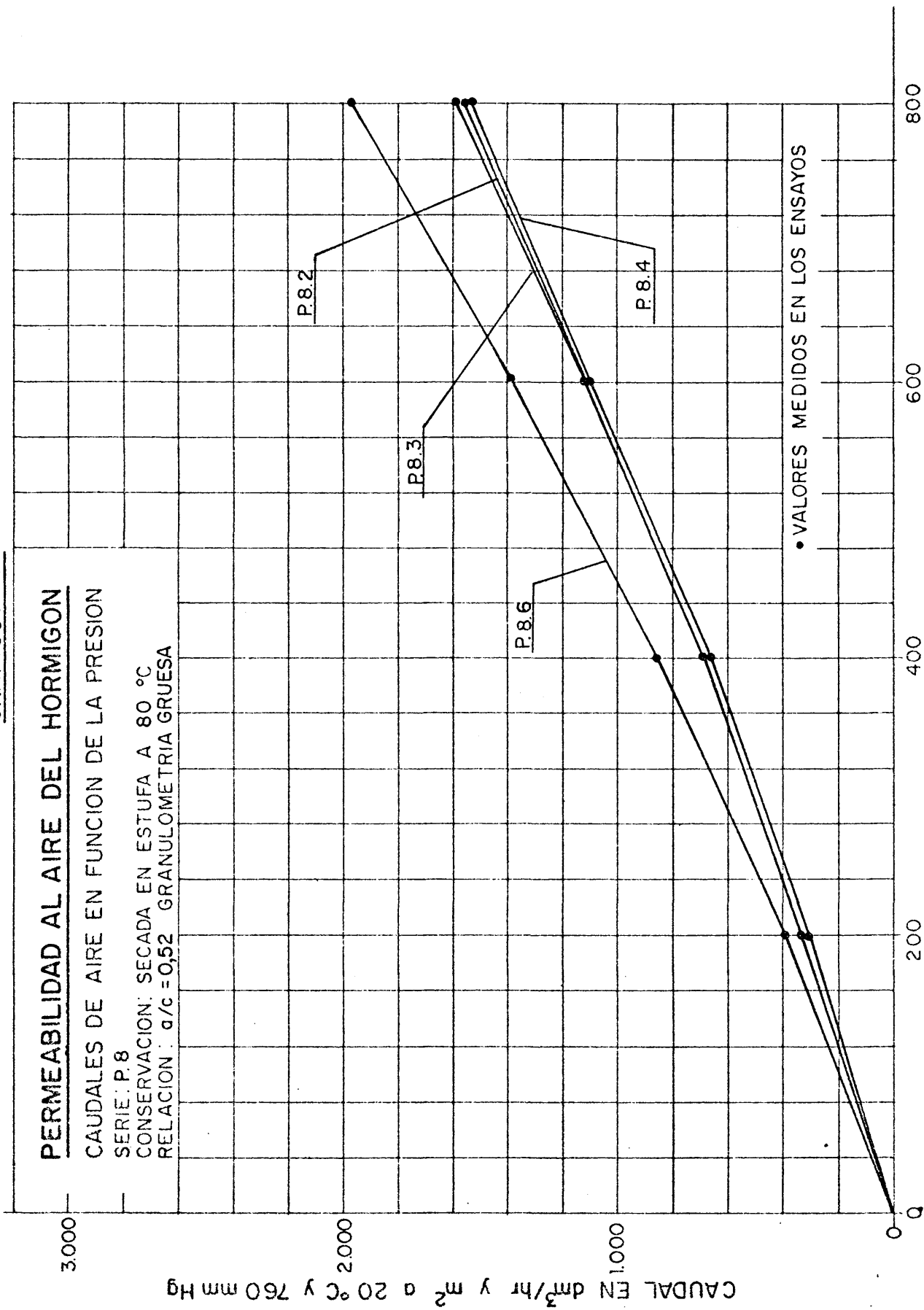
CONSERVACION: SECADA EN ESTUFA A 80 °C

RELACION : $q/c = 0,52$ GRANULOMETRIA GRUESA

CAUDAL EN dm^3/hr y m^2 a 20 °C y 760 mm Hg

PRESION EN mmHg

• VALORES MEDIDOS EN LOS ENSAYOS



PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CUADRO Nº 33

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.1. RELACION $\frac{Q}{C} = 0,37$ GRANULOMETRIA Fina.

FECHA DE FABRICACION: 9 de Junio de 1971.

VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

CONSERVACION DE LAS PROBETAS	FECHA DE ENSAYO	PESO MEDIO DE LAS PROBETAS (Pondios)	PRESION DE ENSAYO (mm Hg)	CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a 20°C y 760 mm Hg
AL AMBIENTE DEL LABORATORIO	del 14 al 20 de Febrero de 1973.	2.321,8	200	56,8
			400	120,5
			600	200,2
			800	284,4
SECADAS EN ESTUFA A 40°C .	del 14 de Oc- tubre al 20 de Noviembre de 1973.	2.318,2	200	64,1
			400	142,3
			600	228,4
			800	336,2
SECADAS EN ESTUFA A 60°C .	del 5 al 7 de Febrero de - 1974.	2.312,0	200	87,3
			400	181,9
			600	290,6
			800	408,4
SECADAS EN ESTUFA A 80°C .	del 28 de Mar- zo al 8 de - Abril de 1974	2.303,8	200	121,5
			400	267,5
			600	420,2
			800	619,3

OBSERVACIONES Se han tomado como representativas las probetas 1; 2;
3 y 4.

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CUADRO N° 34

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.2. RELACION $\frac{Q}{C} = 0,42$ GRANULOMETRIA Fina.

FECHA DE FABRICACION: 11 de Junio de 1971.

VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

CONSERVACION DE LAS PROBETAS	FECHA DE ENSAYO	PESO MEDIO DE LAS PROBETAS (Pondios)	PRESION DE ENSAYO (mm Hg)	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a 20°C y 760 mm Hg
AL AMBIENTE DEL LABORATORIO	del 22 de Fe brero al 22 de Marzo de 1973.	2.308,9	200	94,8
			400	207,7
			600	330,9
			800	477,4
SECADAS EN ESTUFA A 40°C.	del 21 al 27 de Noviembre de 1973.	2.306,0	200	111,0
			400	243,0
			600	405,2
			800	567,8
SECADAS EN ESTUFA A 60°C.	del 15 al 21 de Febrero - de 1974.	2.300,9	200	134,5
			400	290,4
			600	473,4
			800	671,5
SECADAS EN ESTUFA A 80°C.	del 9 al 18 de Abril de 1974.	2.293,6	200	183,7
			400	397,7
			600	658,7
			800	948,0

OBSERVACIONES Se han tomado como representativas las probetas 1 y 2.

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CUADRO Nº 35

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.3. RELACION $\frac{Q}{C} = 0,47$ GRANULOMETRIA Fina.

FECHA DE FABRICACION: 14 de Junio de 1971.

VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

CONSERVACION DE LAS PROBETAS	FECHA DE ENSAYO	PESO MEDIO DE LAS PROBETAS (Pondios)	PRESION DE ENSAYO (mm Hg)	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² , a 20°C y 760 mm Hg
AL AMBIENTE DEL LABORATORIO	del 22 al 27 de Marzo de 1973.	2.269,5	200	119,1
			400	260,9
			600	427,2
			800	608,5
SECADAS EN ESTUFA A 40°C.	del 27 de No viembre al 4 de Diciembre de 1973.	2.267,7	200	136,8
			400	295,4
			600	438,6
			800	688,7
SECADAS EN ESTUFA A 60°C.	del 21 al 28 de Febrero de 1974.	2.260,4	200	162,9
			400	364,7
			600	576,7
			800	822,9
SECADAS EN ESTUFA A 80°C.	del 18 al 23 de Abril de 1974.	2.255,2	200	197,2
			400	430,4
			600	697,9
			800	1.008,9

OBSERVACIONES Se han tomado como representativas la 1; 2; y 4.

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CUADRO Nº 36

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.4. RELACION $\frac{a}{c} = 0,52$ GRANULOMETRIA Fina.

FECHA DE FABRICACION: 18 de Junio de 1971.

VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

CONSERVACION DE LAS PROBETAS	FECHA DE ENSAYO	PESO MEDIO DE LAS PROBETAS (Pondios)	PRESION DE ENSAYO (mm Hg)	CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a 20°C y 760 mm Hg
AL AMBIENTE DEL LABORATORIO	del 28 al 30 de Marzo de 1973.	2.307,7	200	149,9
			400	322,0
			600	516,4
			800	759,9
SECADAS EN ESTUFA A 40°C .	del 4 al 6 de Diciembre de 1973.	2.305,3	200	184,5
			400	406,5
			600	666,7
			800	946,7
SECADAS EN ESTUFA A 60°C .	del 1 al 6 de Marzo de 1974.	2.297,9	200	244,3
			400	531,6
			600	870,4
			800	1.269,0
SECADAS EN ESTUFA A 80°C .	del 23 al 29 de Abril de 1974.	2.292,8	200	304,1
			400	643,2
			600	1.075,6
			800	1.512,1

OBSERVACIONES Se han tomado como representativas las probetas 2; 3 y 6
(menos al ambiente, que no fue ensayada la nº 6).

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CUADRO Nº 37

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.5. RELACION $\frac{Q}{C} = 0,37$ GRANULOMETRIA Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 21 de Junio de 1971.

VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

CONSERVACION DE LAS PROBETAS	FECHA DE ENSAYO	PESO MEDIO DE LAS PROBETAS (Pondios)	PRESION DE ENSAYO (mm Hg)	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² a 20°C y 760 mm Hg
AL AMBIENTE DEL LABORATORIO	del 30 de Mar- zo al 4 de - Abril de 1973.	2.291,1	200	231,5
			400	504,0
			600	812,3
			800	1.164,8
SECADAS EN ESTUFA A 40°C.	del 6 al 17 de Diciembre de 1973.	2.289,0	200	277,5
			400	628,5
			600	999,7
			800	1.446,6
SECADAS EN ESTUFA A 60°C.	del 6 al 11 de Marzo de 1974.	2.281,0	200	416,3
			400	893,9
			600	1.445,1
			800	2.060,1
SECADAS EN ESTUFA A 80°C.	del 30 de Abril al 7 de Mayo de 1974.	2.274,6	200	578,0
			400	1.236,1
			600	2.025,5
			800	2.897,5

OBSERVACIONES Se han tomado como representativas las probetas 2; 3;
4 y 5.

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CUADRO Nº 38

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.6. RELACION $\frac{Q}{C} = 0,42$ GRANULOMETRIA Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 23 de Junio de 1971.

VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

CONSERVACION DE LAS PROBETAS	FECHA DE ENSAYO	PESO MEDIO DE LAS PROBETAS (Pondios)	PRESION DE ENSAYO (mm Hg)	CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2 \text{ a } 20^\circ\text{C}$ y 760 mm Hg
AL AMBIENTE DEL LABORATORIO	del 4 al 9 de Abril de 1973.	2.302,2	200	185,5
			400	405,6
			600	653,1
			800	930,2
SECADAS EN ESTUFA A 40°C .	del 17 de Di ciembre de 1973, al 9 de Enero de 1974.	2.297,9	200	228,4
			400	507,2
			600	833,7
			800	1.175,6
SECADAS EN ESTUFA A 60°C .	del 12 al 14 de Marzo de 1974.	2.293,1	200	314,5
			400	679,2
			600	1.091,0
			800	1.568,3
SECADAS EN ESTUFA A 80°C .	del 7 al 10 de Mayo de 1974.	2.286,7	200	411,1
			400	870,4
			600	1.465,1
			800	2.035,1

OBSERVACIONES Se han tomado como representativas las probetas 1; 2;
3 y 4.

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CUADRO Nº 39

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.7. RELACION $\frac{Q}{C} = 0,47$ GRANULOMETRIA Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 24 de Junio de 1971.

VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

CONSERVACION DE LAS PROBETAS	FECHA DE ENSAYO	PESO MEDIO DE LAS PROBETAS (Pondios)	PRESION DE ENSAYO (mm Hg)	CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a 20°C y 760 mm Hg
AL AMBIENTE DEL LABORATORIO	del 9 al 10 de Abril de 1973 y del 13 al 14 de Fe- brero de 1974.	2.311,9	200	182,1
			400	402,9
			600	671,5
			800	959,3
SECADAS EN ESTUFA A 40°C .	del 9 al 15 de Enero de 1974.	2.310,0	200	218,9
			400	485,2
			600	792,1
			800	1.120,7
SECADAS EN ESTUFA A 60°C .	del 15 al 25 de Marzo de 1974.	2.304,3	200	290,5
			400	652,9
			600	1.065,2
			800	1.509,3
SECADAS EN ESTUFA A 80°C .	del 10 al 17 de Mayo de 1974.	2.298,0	200	405,2
			400	891,2
			600	1.512,7
			800	2.157,5

OBSERVACIONES Se han tomado como representativas las probetas 1; 2;
3 y 6.

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CUADRO Nº 40

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION

SERIE: P.8 RELACION $\frac{a}{c} = 0,52$ GRANULOMETRIA Gruesa.

FECHA DE FABRICACION: 28 de Junio de 1971.

VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

CONSERVACION DE LAS PROBETAS	FECHA DE ENSAYO	PESO MEDIO DE LAS PROBETAS (Pondios)	PRESION DE ENSAYO (mm Hg)	CAUDAL EN dm ³ /hr y m ² , a 20°C y 760 mm Hg
AL AMBIENTE DEL LABORATORIO	del 11 al 17 de Abril de 1973.	2.274,1	200	149,2
			400	321,4
			600	507,7
			800	731,5
SECADAS EN ESTUFA A 40°C.	del 15 al 23 de Enero de 1974.	2.271,2	200	177,5
			400	405,2
			600	662,4
			800	949,7
SECADAS EN ESTUFA A 60°C.	del 25 al 28 de Marzo de 1974.	2.265,0	200	257,7
			400	550,0
			600	913,5
			800	1.302,5
SECADAS EN ESTUFA A 80°C.	del 20 al 22 de Mayo de - 1974.	2.260,1	200	316,9
			400	682,7
			600	1.110,0
			800	1.554,7

OBSERVACIONES Se han tomado como representativas las probetas 2; 3 y 4.

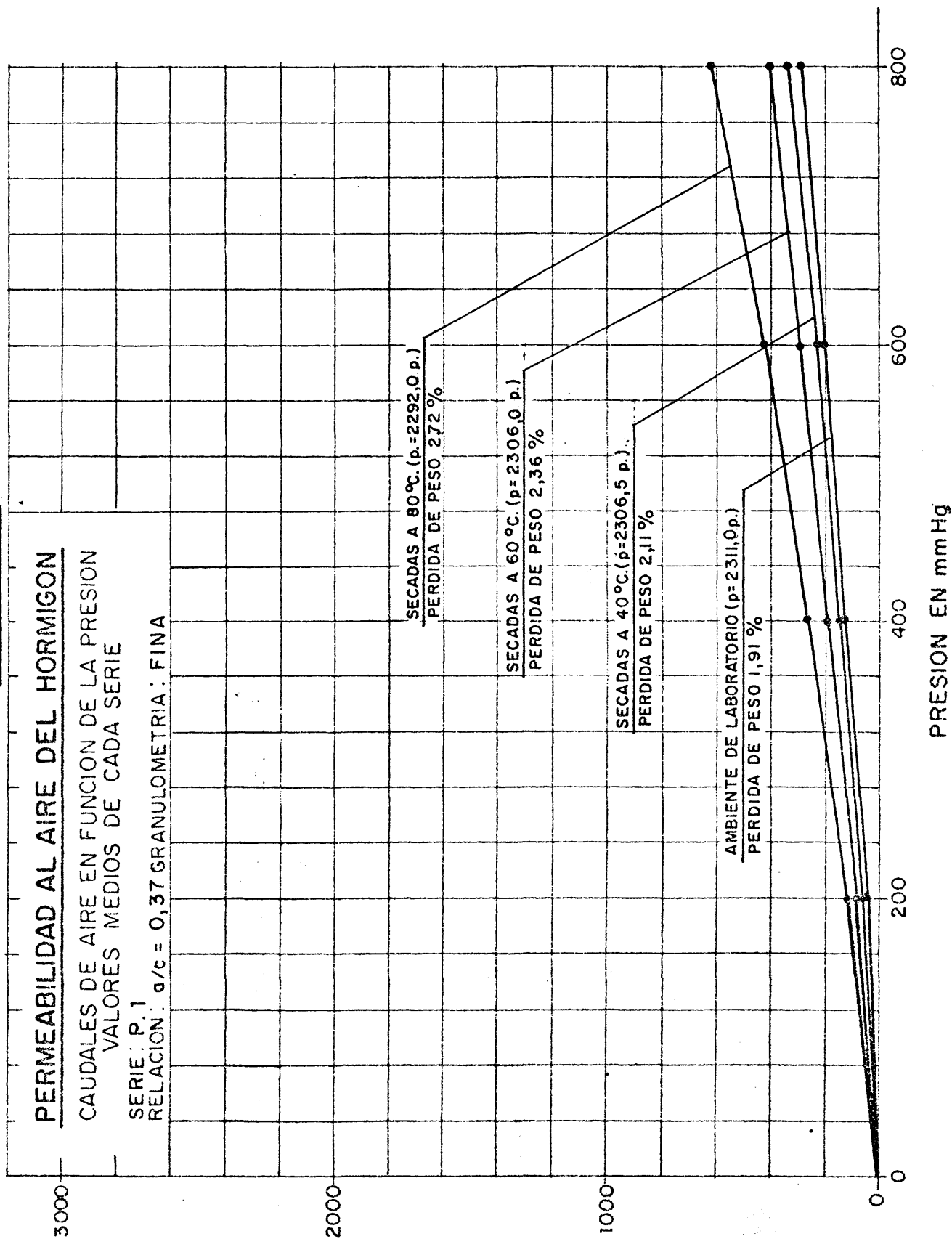
PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION
VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

SERIE: P. 1

RELACION: $\alpha/c = 0,37$ GRANULOMETRIA: FINA

CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a $20^\circ\text{C y } 760\text{ mmHg}$



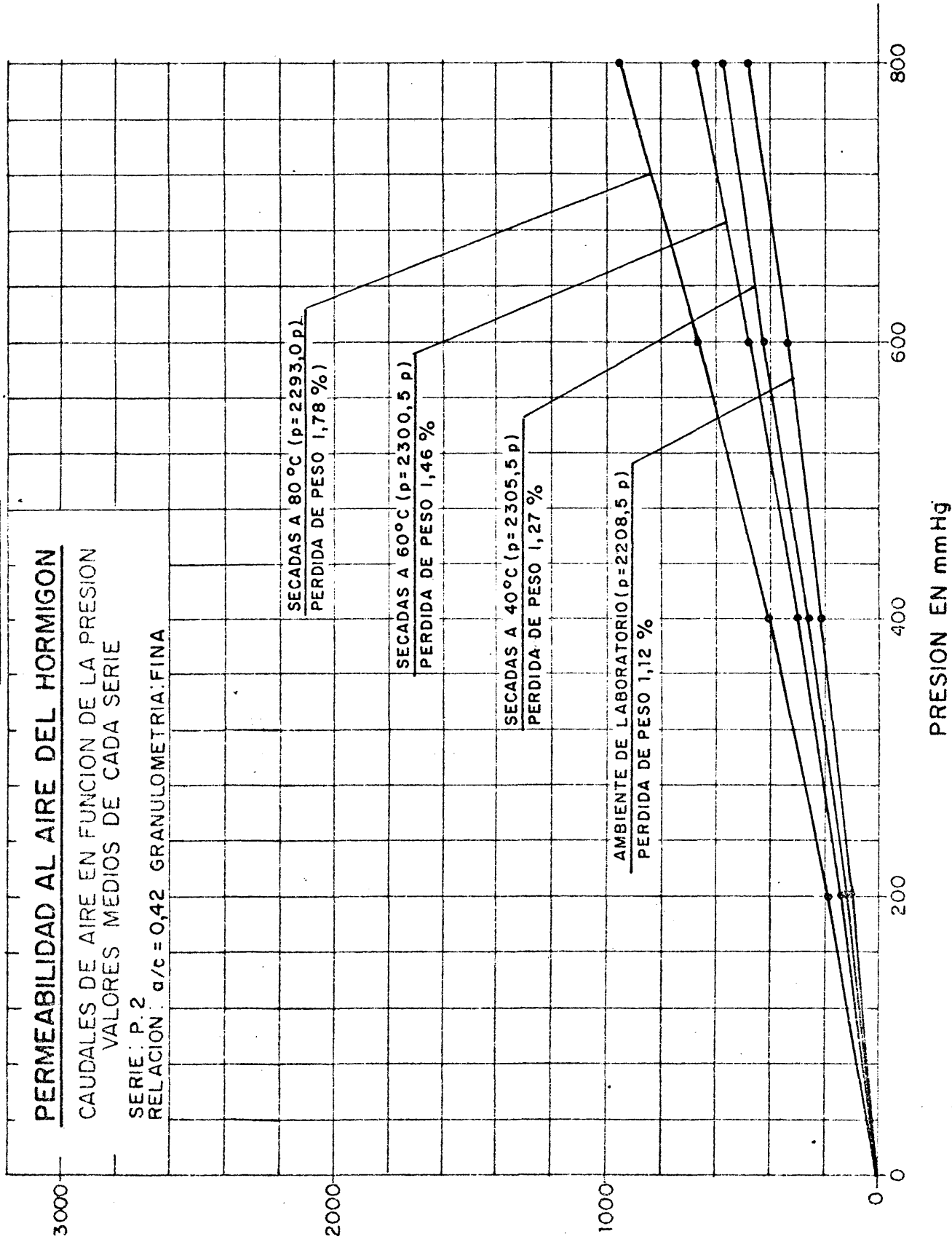
PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION
VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

SERIE: P.2

RELACION: $\alpha/c = 0,42$ GRANULOMETRIA: FINA

CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a $20^\circ\text{C y } 760\text{ mmHg}$



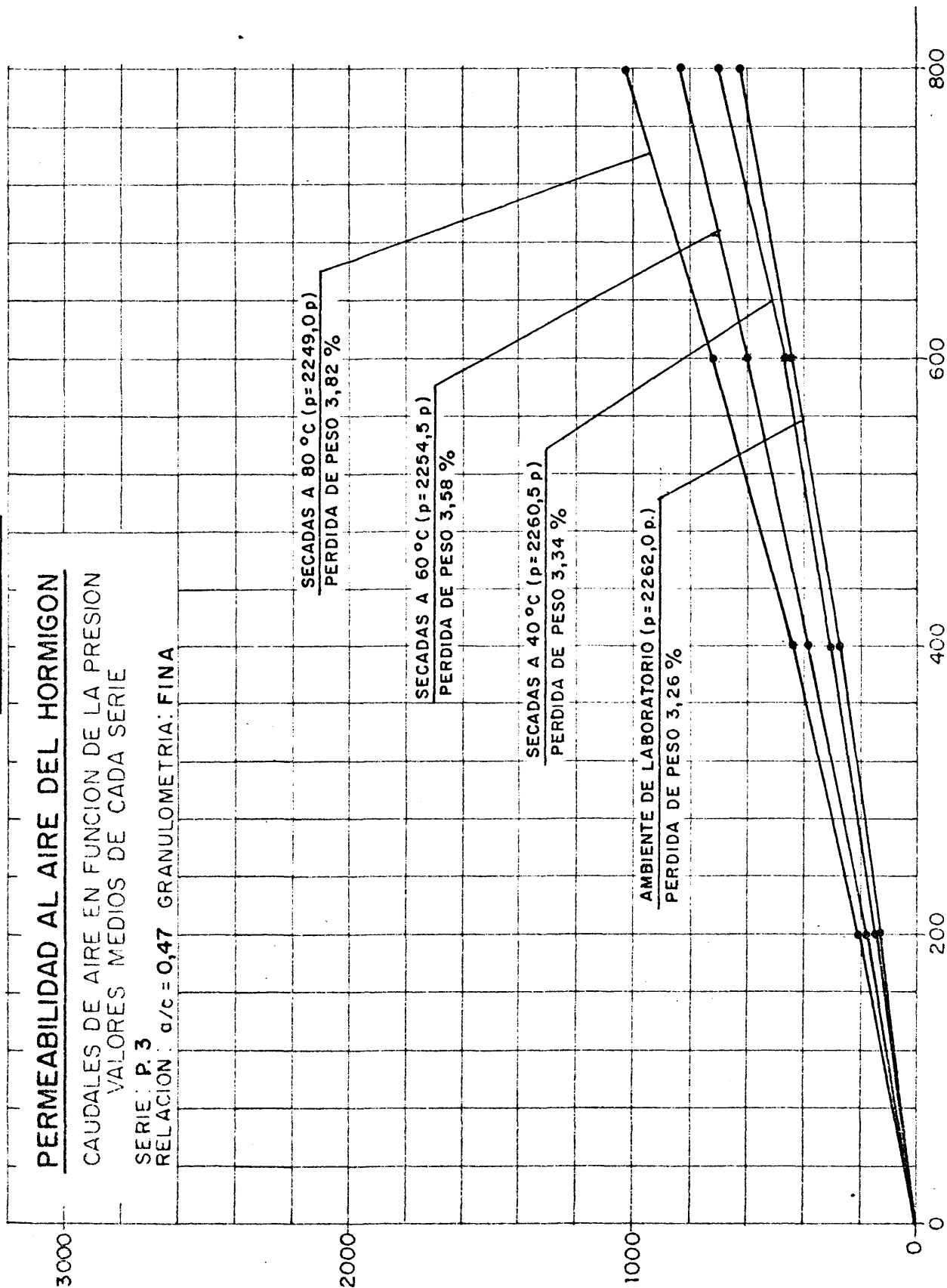
PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION
VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

SERIE: P. 3

RELACION: $q/c = 0,47$ GRANULOMETRIA: FINA

CAUDAL EN dm^3/hr y m^2 a $20^\circ C$ y $760 mmHg$



PRESION EN mmHg

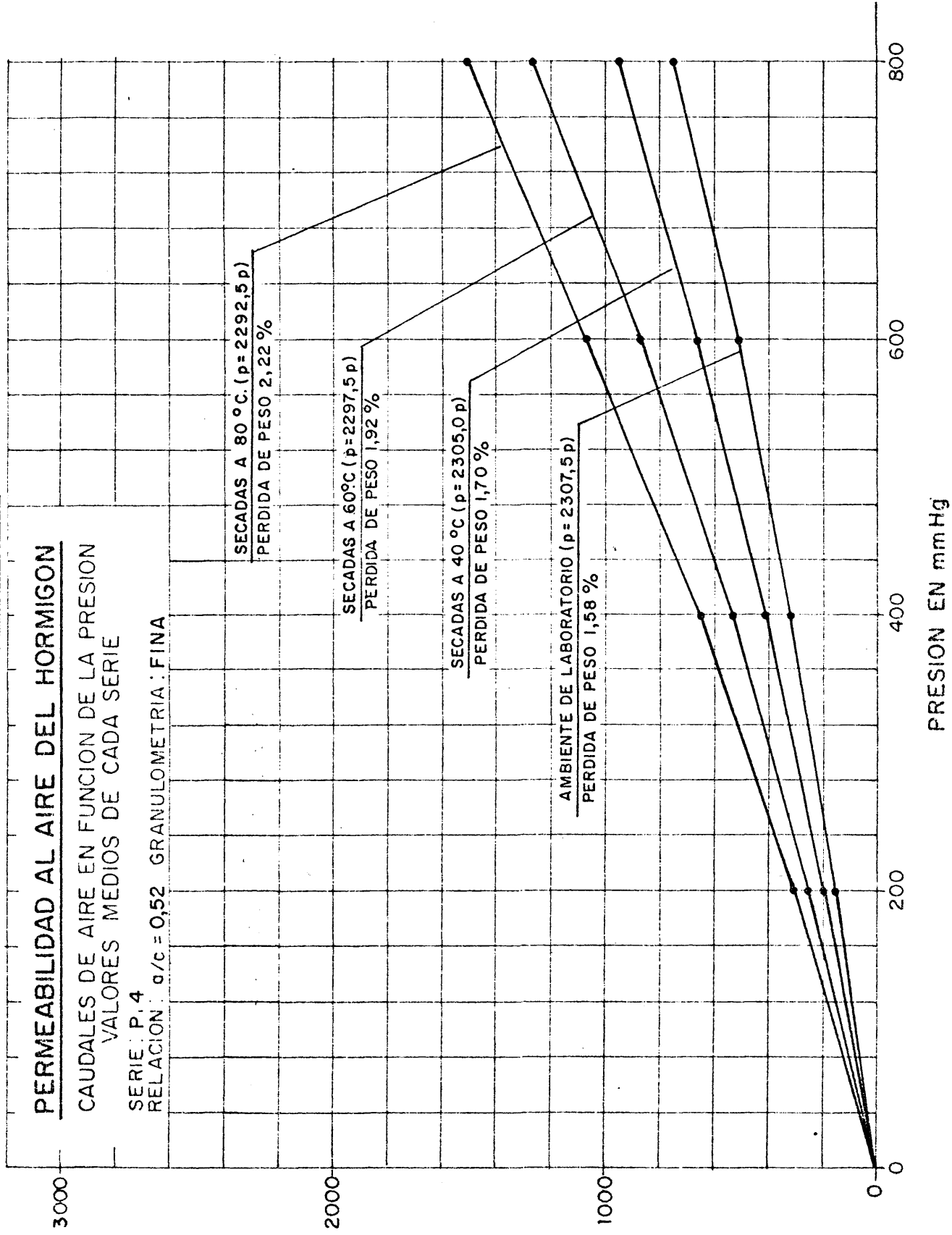
PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION
VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

SERIE: P. 4

RELACION: $\alpha/c = 0,52$ GRANULOMETRIA: FINA

CAUDAL EN dm^3/hr y m^2 a 20°C y 760 mmHg

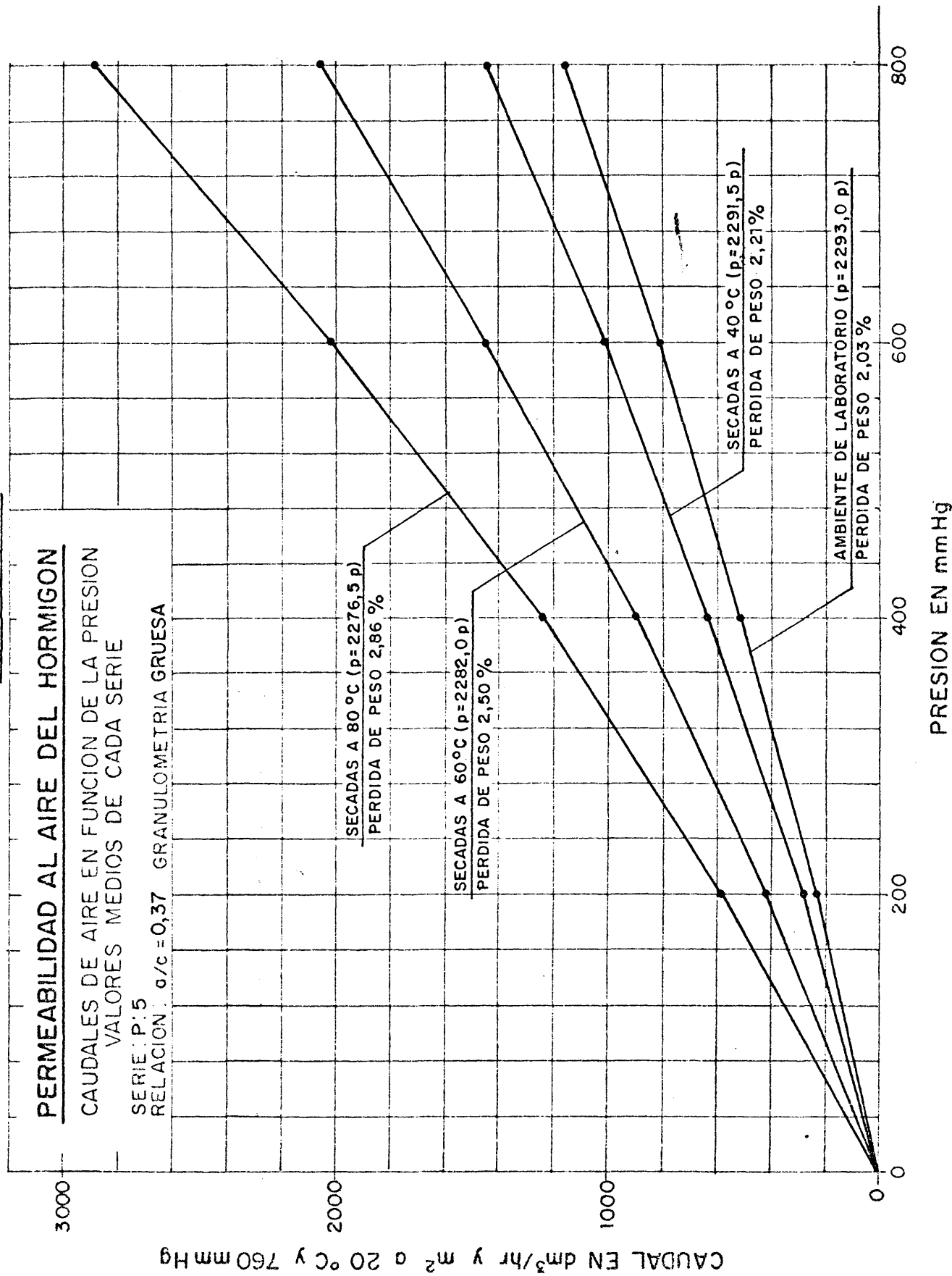


PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION
VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

SERIE P:5

RELACION $\sigma/c = 0,37$ GRANULOMETRIA GRUESA



PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

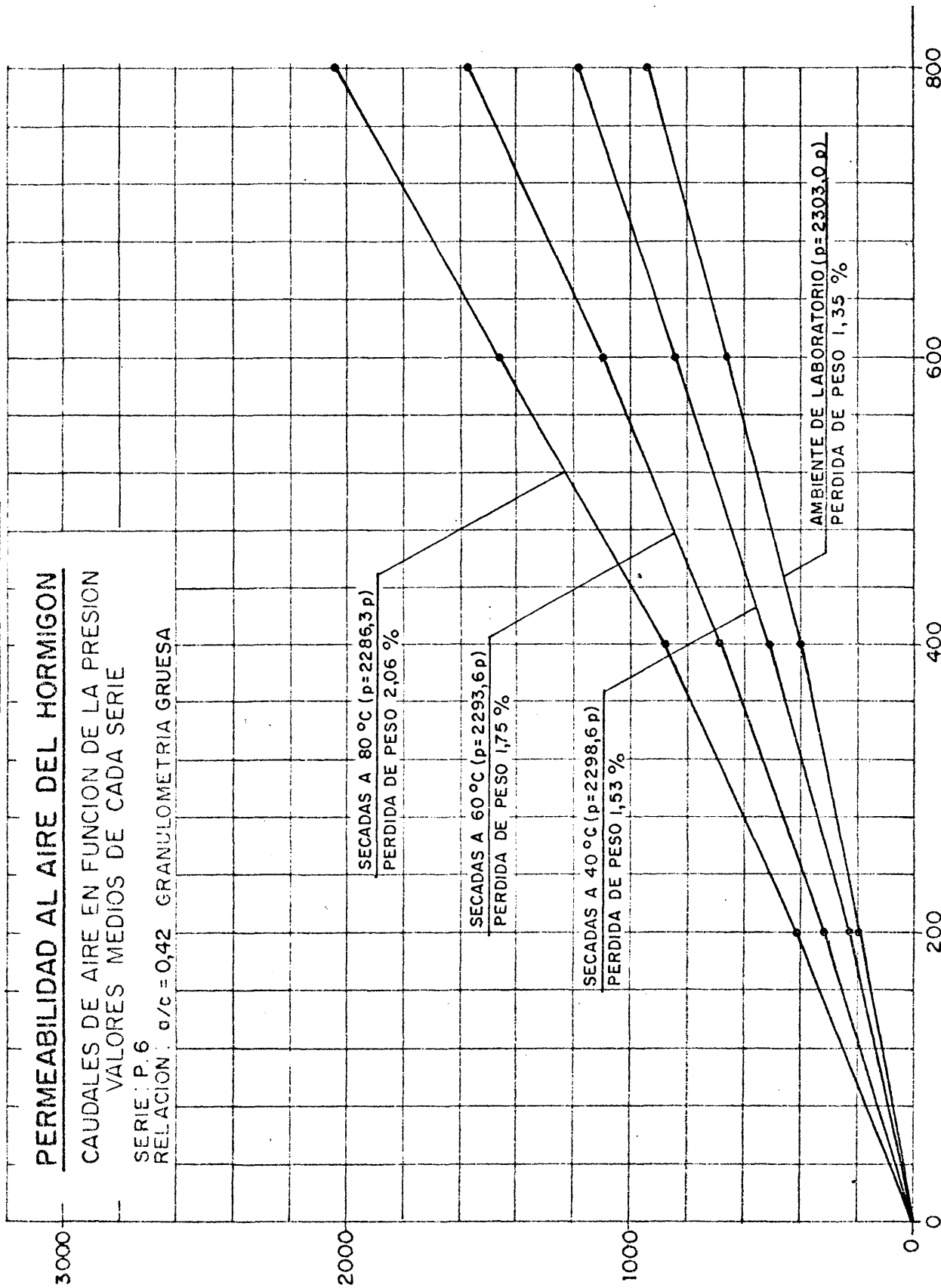
CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION
VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

SERIE: P. 6

RELACION: $\sigma/c = 0,42$ GRANULOMETRIA GRUESA

CAUDAL EN $\text{dm}^3/\text{hr y m}^2$ a $20^\circ\text{C y } 760\text{ mmHg}$

PRESION EN mmHg



PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION
VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

SERIE: P.7

RELACION: $\sigma/c = 0,47$ GRANULOMETRIA GRUESA

CAUDAL EN dm^3/hr y m^2 a $20^\circ C$ y $760 mmHg$

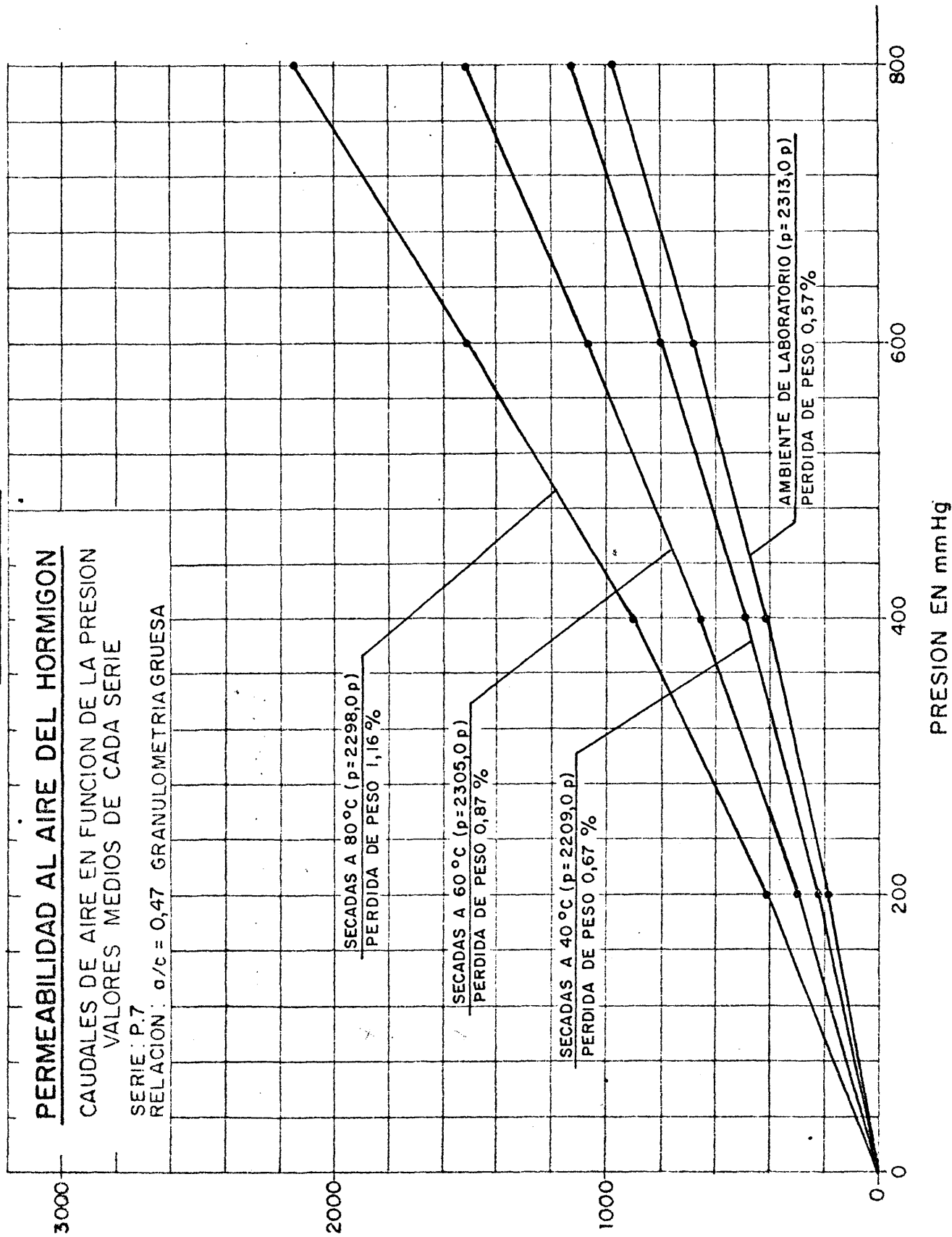


GRAFICO XL

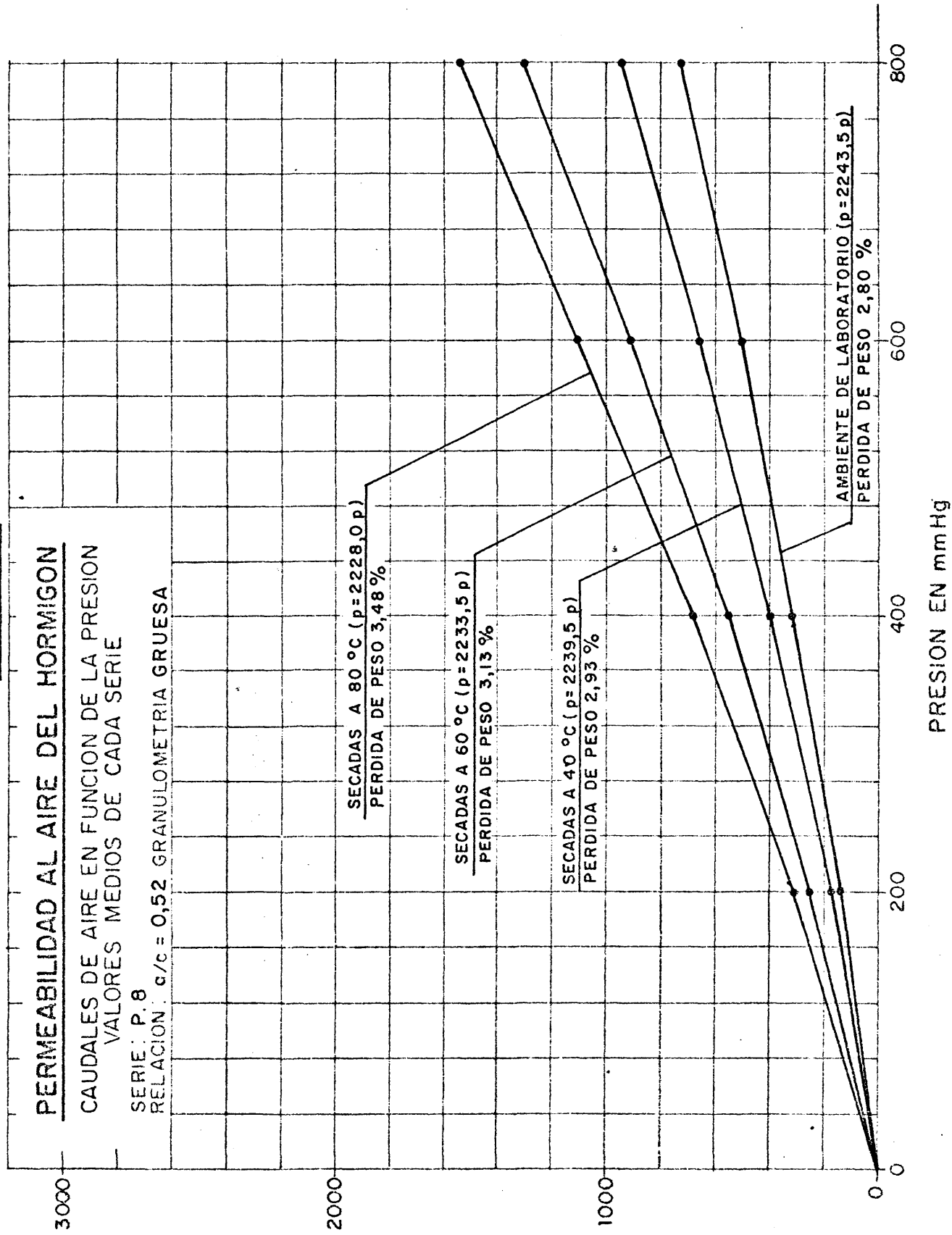
PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA PRESION
VALORES MEDIOS DE CADA SERIE

SERIE: P. 8

RELACION: $g/c = 0,52$ GRANULOMETRIA GRUESA

CAUDAL EN dm^3/hr y m^2 a $20^\circ C$ y $760 mmHg$



IV.5.1.- Influencia de la diferencia de presión entre las superficies opuestas de la probeta.

A fin de facilitar el estudio de la influencia que tiene la diferencia de presión en el paso del aire a través del hormigón se ha preparado el cuadro nº 41 en el que, para cada probeta, se ha calculado el aumento del caudal de aire al aumentar la presión.

A la vista de este cuadro se observa que el aumento de los caudales, al aumentar la presión, guarda la misma relación para todos los tipos de hormigón ensayados y, también, es la misma independientemente del grado de secado.

El que para un determinado tipo de hormigón la filtración de aire sea únicamente función de la presión significa que este material cumple la ley de Darcy.

Efectivamente, cuando un volumen Q de un fluido, pasa a través de un medio poroso de sección A , en un tiempo t , la velocidad aparente del flujo es:

$$u = \frac{Q}{At}$$

RELACION DE LOS CAUDALES EN FUNCION DE LA PRESION

CONSER- VACION DE LAS PROBETAS	PRESION DE ENSAYO mm Hg	G R A N U L O M E T R I A F I N A				G R A N U L O M E T R I A G R U E S A											
		P. 1 o/c=0,37		P. 2 o/c=0,42		P. 3 o/c=0,47		P. 4 o/c=0,52		P. 5 o/c=0,37		P. 6 o/c=0,42		P. 7 o/c=0,47		P. 8 o/c=0,52	
		Q dm ³ /hym ²	$\frac{Q_{i+1}}{Q_i}$	Q dm ³ /hym ²	$\frac{Q_{i+1}}{Q_i}$	Q dm ³ /hym ²	$\frac{Q_{i+1}}{Q_i}$	Q dm ³ /hym ²	$\frac{Q_{i+1}}{Q_i}$	Q dm ³ /hym ²	$\frac{Q_{i+1}}{Q_i}$	Q dm ³ /hym ²	$\frac{Q_{i+1}}{Q_i}$	Q dm ³ /hym ²	$\frac{Q_{i+1}}{Q_i}$	Q dm ³ /hym ²	$\frac{Q_{i+1}}{Q_i}$
AL AMBIENTE DEL LABORAT. 20°C y 50% H.R.	200	57	2,10	95	2,19	119	2,19	150	2,15	231	2,18	186	2,18	182	2,21	149	2,15
	400	120	1,67	208	1,59	261	1,64	322	1,60	504	1,61	406	1,61	403	1,67	321	1,58
	600	200	1,42	331	1,44	427	1,43	516	1,47	812	1,43	653	1,42	672	1,42	508	1,44
	800	284		477		609		760		1.165		930		959		732	
SECADAS EN ESTUFA A 40 °C	200	64	2,22	111	2,19	137	2,15	185	2,20	273	2,26	228	2,22	219	2,21	178	2,27
	400	142	1,61	243	1,67	295	1,56	407	1,64	628	1,59	507	1,64	485	1,63	405	1,63
	600	228	1,47	405	1,40	460	1,50	668	1,42	1.000	1,45	834	1,41	792	1,41	662	1,43
	800	336		568		689		947		1.447		1.176		1.121		950	
SECADAS EN ESTUFA A 60 °C	200	87	2,09	134	2,16	163	2,24	244	2,18	416	2,15	315	2,15	291	2,24	258	2,13
	400	182	1,60	290	1,63	365	1,58	532	1,63	894	1,62	679	1,61	653	1,63	550	1,66
	600	291	1,40	473	1,42	577	1,43	870	1,46	1.445	1,43	1.091	1,44	1.065	1,42	914	1,43
	800	408		672		823		1.269		2.060		1.568		1.509		1.303	
SECADAS EN ESTUFA A 80 °C	200	122	2,19	184	2,16	197	2,18	304	2,11	578	2,14	411	2,12	405	2,20	317	2,15
	400	267	1,57	398	1,65	430	1,62	643	1,67	1.236	1,64	870	1,68	891	1,70	683	1,63
	600	420	1,47	659	1,44	698	1,45	1.076	1,40	2.026	1,43	1.465	1,39	1.513	1,43	1.110	1,40
	800	619		948		1.009		1.512		2.897		2.035		2.158		1.555	

La ley de Darcy establece que dicha velocidad es proporcional al gradiente de presión:

$$u = -B_1 \frac{\partial p}{\partial x}$$

en la que la filtración es paralela al eje de las x . En el caso de un elemento de longitud L , el coeficiente B_1 sería, entonces, un coeficiente de permeabilidad.

Esta expresión es aplicable a los fluidos incomprensibles. En el caso de los gases la velocidad de filtración varía de unos puntos a otros cuando la presión disminuye, pero la velocidad de filtración másica $G = \rho u$ (siendo ρ la densidad del gas a la presión p) debe permanecer constante.

$$G = \rho u = -B_1 \rho \frac{\partial p}{\partial x}$$

En el caso que nos ocupa se puede considerar que el fenómeno es isotermo*. Si u_1 es la velocidad de la filtración en un extremo de la superficie del medio donde la presión es p_1 se tendrá:

$$p_1 u_1 = p \cdot u = -B_1 \frac{\partial p}{\partial x}$$

integrando sobre toda la longitud L del medio poroso y teniendo en cuenta que B_1 (que es función de la viscosidad) es independiente de p se llega a:

$$p_1 u_1 = B_1 \frac{p_1^2 - p_2^2}{2L}$$

* La viscosidad de un gas, como su conductividad térmica, es independiente de su presión a una temperatura determinada. Kaufman "Teoría Cinética de los gases", Editorial Reverte, año 1970.

de donde:

$$u_1 = B_1 \frac{\bar{p}}{p_1} \cdot \frac{\Delta p}{L}$$

siendo $\bar{p} = \frac{1}{2} (p_1 + p_2)$ = presión media.

Es decir que la velocidad de filtración, a una determinada - temperatura de secado, es función de la presión.

Un desarrollo muy completo sobre la teoría de la filtración de gases a través de los medios porosos ha sido incluido - por P.C. Carman en un trabajo publicado en 1961 (32).

Para la deducción de la ley que liga la velocidad de filtra- ción, o los caudales, en función de la presión se pueden to- mar los valores medios del cuadro anterior. Dichos valores medios son los siguientes:

$$\frac{Q_{400}}{Q_{200}} = 2,18$$

$$\frac{Q_{600}}{Q_{400}} = 1,62$$

$$\frac{Q_{800}}{Q_{600}} = 1,43$$

Con el fin de comprobar la fiabilidad de estos valores se - presenta a continuación los grados de probabilidad del 5 y - 1%, en función de los valores deducidos por Student-Fisher para los 32 grados de libertad, correspondientes a los ensa- yos efectuados y con los umbrales de significación que nor- malmente se adoptan.

VALOR MEDIO \bar{x}	DESVIACION CUADRATICA MEDIA. $s = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$	ERROR ABSOLUTO PROBABLE $\varepsilon \leq \pm \frac{s t}{n-1}$		LIMITES DE CONFIANZA	
		Para el 5% $t = 2,045$	Para el 1% $t = 2,740$	Para $p=5\%$ $\bar{x} \pm \varepsilon$	Para $p=1\%$ $\bar{x} \pm \varepsilon$
2,18	0,044	$\pm 0,016$	$\pm 0,021$	$2,18 \pm 0,7\%$	$2,18 \pm 1\%$
1,62	0,035	$\pm 0,013$	$\pm 0,017$	$1,62 \pm 0,8\%$	$1,62 \pm 1,1\%$
1,43	0,024	$\pm 0,009$	$\pm 0,012$	$1,43 \pm 0,6\%$	$1,43 \pm 0,8\%$

Resultados altamente satisfactorios, ya que un límite de confianza del orden del 6 y 7%, para los grados de probabilidad del 5 y 1%, respectivamente, en los ensayos de resistencia a compresión de probetas de hormigón se consideran muy favorables y representativos.

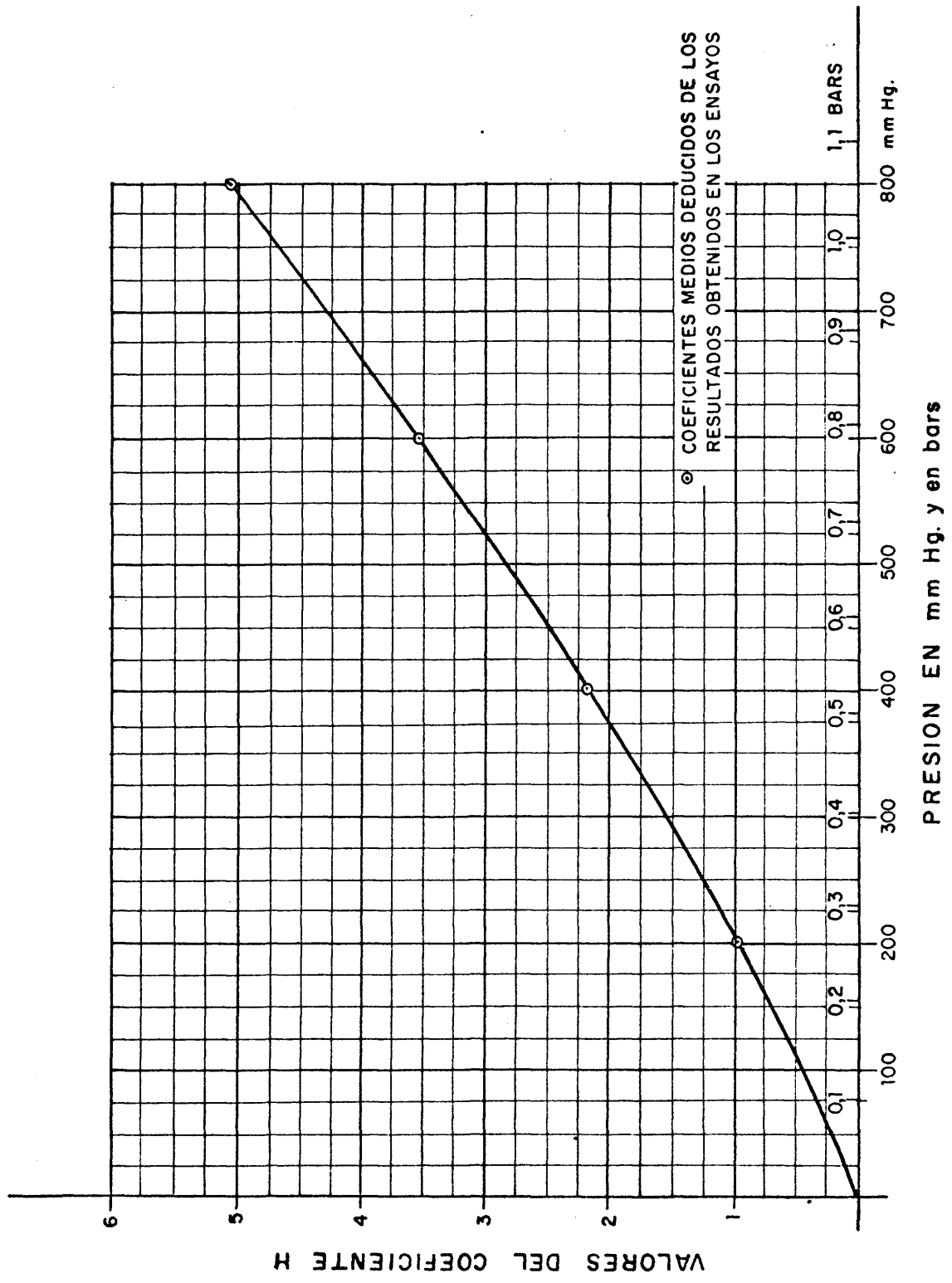
Los coeficientes que da la relación de los caudales en función de la presión, reducidos a la presión de 200 mm de Hg son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 Q_{200} &= 1 \\
 Q_{400} &= 2,18 Q_{200} \\
 Q_{600} &= 3,52 Q_{200} \\
 Q_{800} &= 5,05 Q_{200}
 \end{aligned}$$

Representada gráficamente esta función se obtiene la curva del diagrama que se incluye a continuación.

En dicho diagrama se han representado las presiones en mm de Hg y en bars; ya que estas últimas unidades facilitan unos coeficientes muy sencillos:

DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE LA VARIACION DE LA
PERMEABILIDAD EN FUNCION DE LA PRESION



$$Q = H (1,2 p^2 + 3,5 p)$$

siendo:

Q = caudales de aire filtrado en dm^3/h y m^2 de superficie, a 20°C y 760 mm Hg

p = diferencia de presión entre las dos superficies de la probeta, en bars

H = coeficiente de proporcionalidad, que debe deducirse experimentalmente.

Una vez determinado, para un cierto tipo de hormigón, el coeficiente H, se pueden conocer los caudales que se filtran para otras presiones aplicando esta expresión; la cual se corresponde con el error admitido al proponer los coeficientes que han servido de base para encontrar dicha expresión.

IV.5.2.- Influencia del tipo de dosificación.

Para estudiar la influencia de la dosificación, en el paso del aire a través del hormigón, se ha establecido el siguiente cuadro en el que se recogen las pérdidas de peso de las probetas en función de la temperatura de secado y se han confeccionado los gráficos XLI a XLIV, que se deducen de los resultados obtenidos en los ensayos. En el cuadro se señalan las pérdidas de peso de las probetas saturadas de agua y secadas a 100°C (que se hallaron para conocer su densidad) y la pérdida de peso en las dos condiciones de secado a 40°C y 80°C por ser las más representativas en el trabajo experimental realizado.

PERDIDAS DE PESO DE LAS PROBETAS, TOTAL Y EN TANTO POR CIENTO

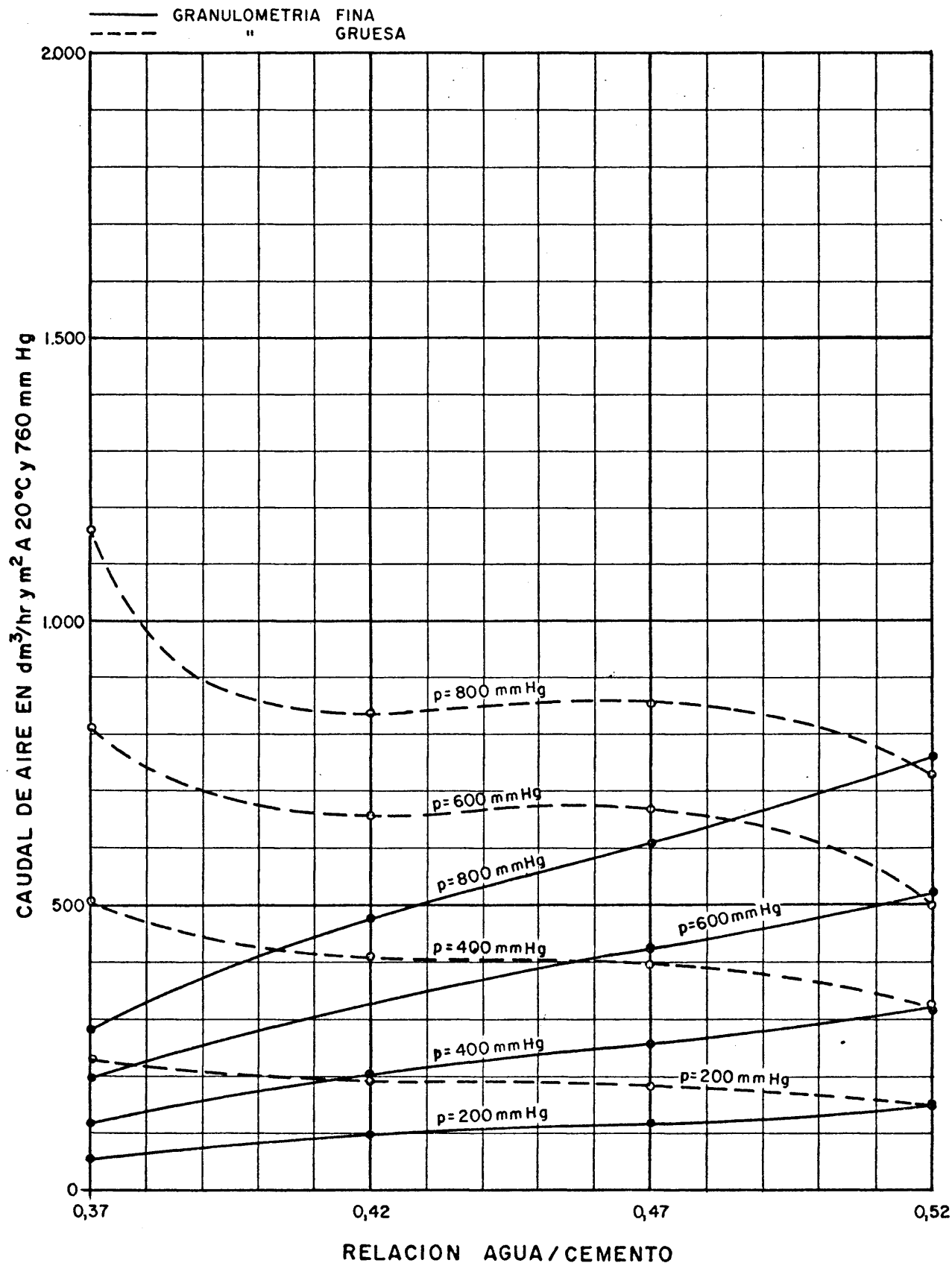
SERIE DE PROBETAS	PESOS MEDIOS DE CADA SERIE EN PONDIOS							
	Saturadas de agua	Secadas a 100°C	Pérdida de peso total y en%		Secadas a 40°C	Secadas a 80°C	Pérdida de peso total y en%	
P.1	2.344,0	2.232,7	111,3	4,75	2.318,2	2.303,8	14,4	0,62
P.2	2.328,6	2.218,7	109,9	4,72	2.292,8	2.279,8	13,0	0,56
P.3	2.336,0	2.230,4	105,6	4,52	2.267,8	2.255,2	12,6	0,55
P.4	2.339,5	2.221,3	118,2	5,05	2.317,5	2.305,5	12,0	0,52
P.5	2.235,7	2.223,4	112,3	4,81	2.289,0	2.274,6	14,4	0,63
P.6	2.334,3	2.228,0	106,3	4,55	2.298,9	2.286,7	12,2	0,53
P.7	2.329,6	2.223,7	105,9	4,54	2.310,1	2.298,1	12,0	0,52
P.8	2.307,5	2.193,4	141,1	4,94	2.268,7	2.256,8	11,9	0,52

La observación del cuadro de la pérdida de peso, en función de las condiciones de secado, refleja que la cantidad de agua sobrante de evaporación ha sido sensiblemente la misma, independientemente de la relación agua/cemento y de la granulometría, fina o gruesa. Esto, unido a que las distintas clases de dosificación tienen la misma densidad y su resistencia ha sido del mismo orden llevan a la conclusión de que la proporción de huecos en la masa de hormigón ha resultado ser del mismo orden para todas las dosificaciones. Es decir, que la menor cantidad de cemento incluida en la dosificación, al aumentar la relación agua/cemento, se ha sustituido por una mayor proporción de árido.

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA RELACION
AGUA/CEMENTO Y DE LA PRESION DE ENSAYO

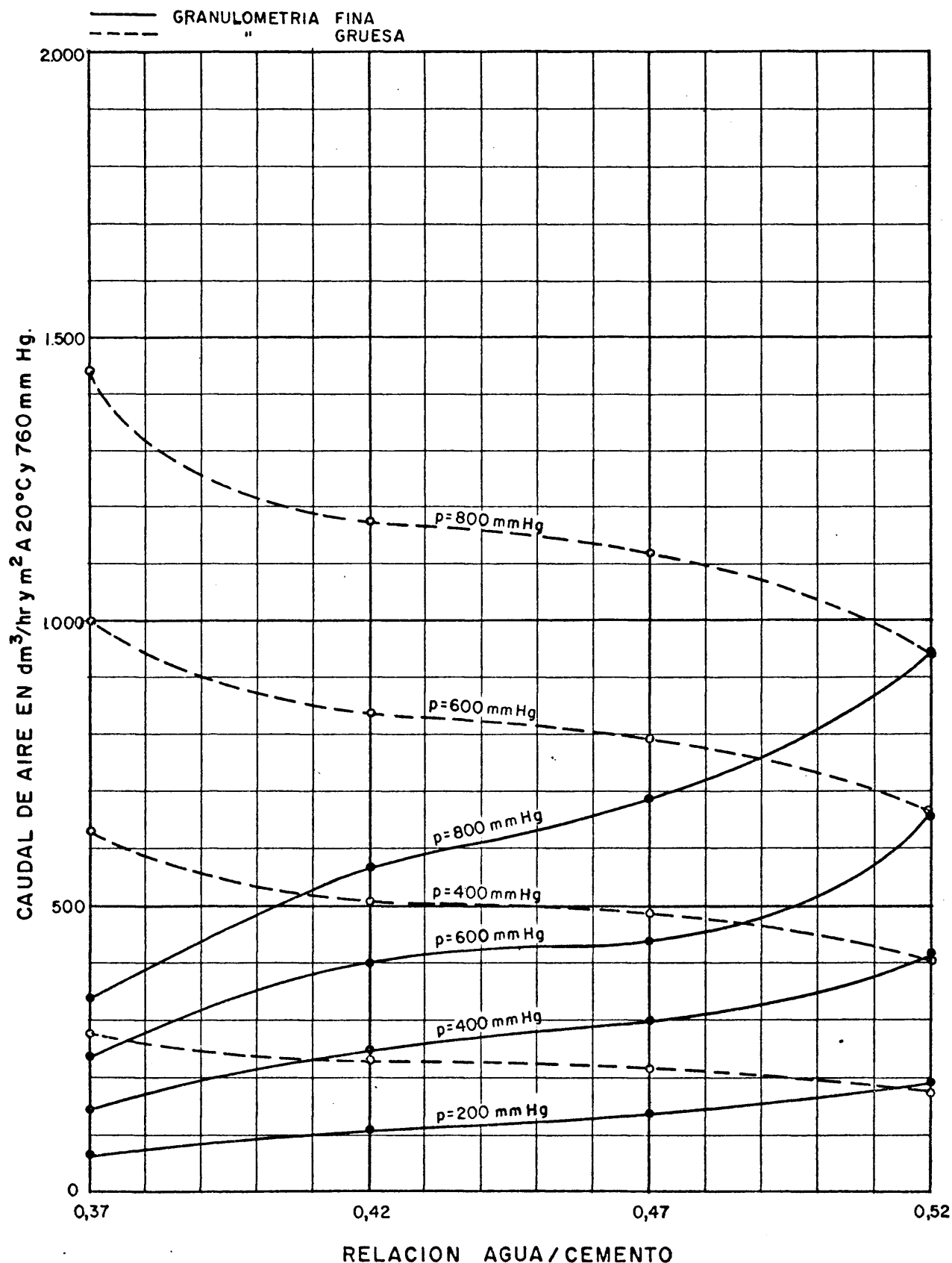
PROBETAS CONSERVADAS AL AMBIENTE DEL LABORATORIO



PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA RELACION
AGUA/CEMENTO Y DE LA PRESION DE ENSAYO

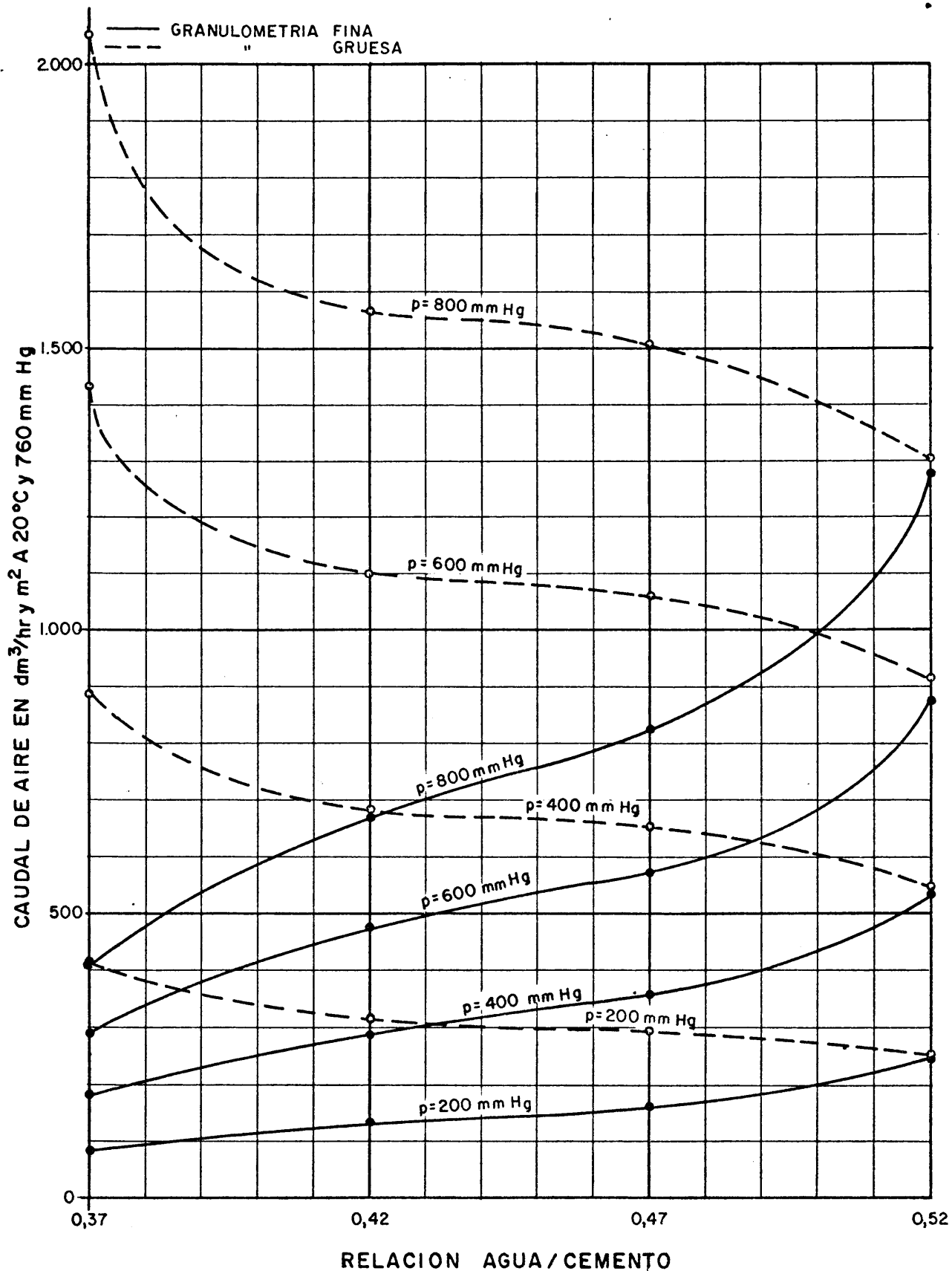
PROBETAS SECADAS EN ESTUFA A 40 °C



PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

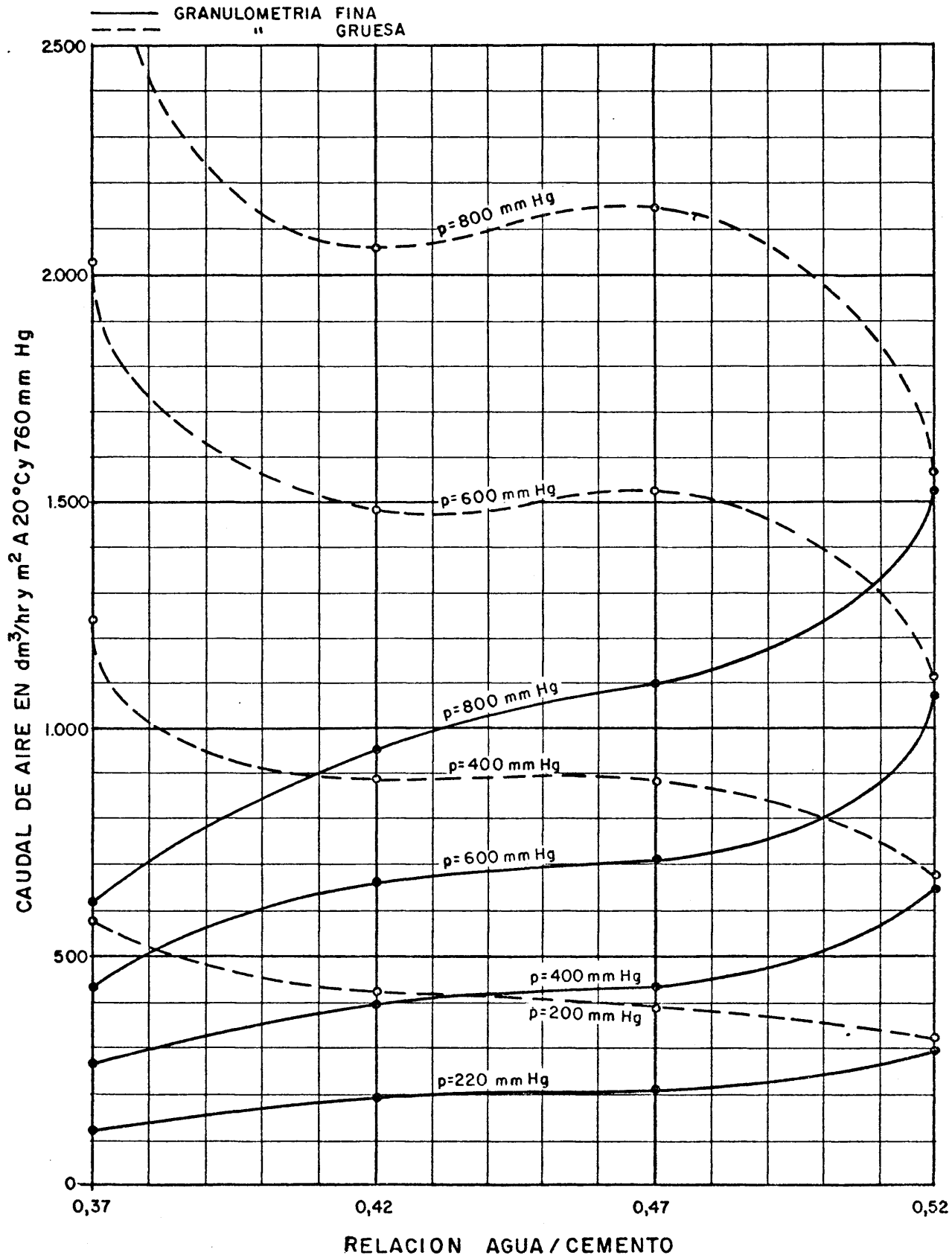
CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA RELACION
AGUA/CEMENTO Y DE LA PRESION DE ENSAYO

PROBETAS SECADAS EN ESTUFA A 60 °C



PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DE LA RELACION
AGUA/CEMENTO Y DE LA PRESION DE ENSAYO
PROBETAS SECADAS EN ESTUFA A 80 °C



Integrando lo dicho con el análisis de los gráficos se llega a las siguientes conclusiones:

- Para una misma relación agua/cemento e iguales condiciones - de secado el hormigón de granulometría fina es más impermeable que el de granulometría gruesa.

Conclusión lógica, ya que el árido fino ofrece una mayor su superficie específica, lo que se traduce en una mayor pérdida de carga debido al aumento del coeficiente de rozamiento - que afecta al fluido.

- La disminución de la proporción de cemento manteniendo la - misma cantidad de agua de amasado, que representa un aumento en la relación agua/cemento, afecta en distinto sentido a la permeabilidad según sea la granulometría del árido fina o gruesa. Es decir, en el caso de la granulometría fina aumenta la permeabilidad y en el de la granulometría gruesa disminuye.

Esto ha de ser debido a que los factores que más influyen - en la porosidad, como ya se ha visto anteriormente (apartado III.2.3) son los poros de los áridos, los de asentamiento y los de la pasta. Cuando la granulometría es fina los huecos resultan más pequeños, (véanse las curvas granulométricas - incluidas en el apartado IV.2), y al disminuir la cantidad de cemento, éste se sustituye, principalmente, con arena - (de mayor densidad aparente que la grava) sin que cambie la compacidad de la masa; por lo cual la porosidad de esta masa de hormigón variará, fundamentalmente, en función de como varíe la de la pasta y como ésta, al hacerla más fluida aumenta su porosidad, la permeabilidad, también aumenta.

En el caso de la granulometría gruesa, con poca cantidad de arena, el tamaño de los huecos es mayor y al disminuir la proporción de cemento la pasta se hace más fluida lo que permite, por una parte, un mejor asentamiento de los áridos y, por otra, un mejor relleno de los huecos. Hay que tener en cuenta que las relaciones agua/cemento de 0,37 a 0,52 proporcionan hormigones más bien secos.

La figura 8 representa la sección, por un corte diametral, que se ha realizado sobre las probetas, en las ocho dosificaciones. Si se observa con atención se aprecia lo señalado anteriormente sobre la distribución de los áridos.

La dependencia, en la porosidad del hormigón, de la granulometría de los áridos y de la relación agua/cemento, influyendo en distinto sentido se comprueba por los tres escalones que se aprecian en los gráficos.

Para el caso de granulometría fina, entre las relaciones agua/cemento 0,37 a 0,42 al ser tan poco fluida la pasta la distribución del árido permanece, prácticamente, invariable por lo que aumenta rápidamente la porosidad de la masa de hormigón. Este aumento se va contrarrestando hasta la relación agua/cemento 0,47 debido a que la mayor fluidez de la pasta permite un mayor asentamiento del árido. A partir de la relación 0,47 ya el asentamiento resulta prácticamente completo y de nuevo es la relación agua/cemento la que influye, decisivamente, en la permeabilidad.

En la granulometría gruesa la evolución del fenómeno es semejante a la anterior pero influyendo en sentido inverso. Al dis

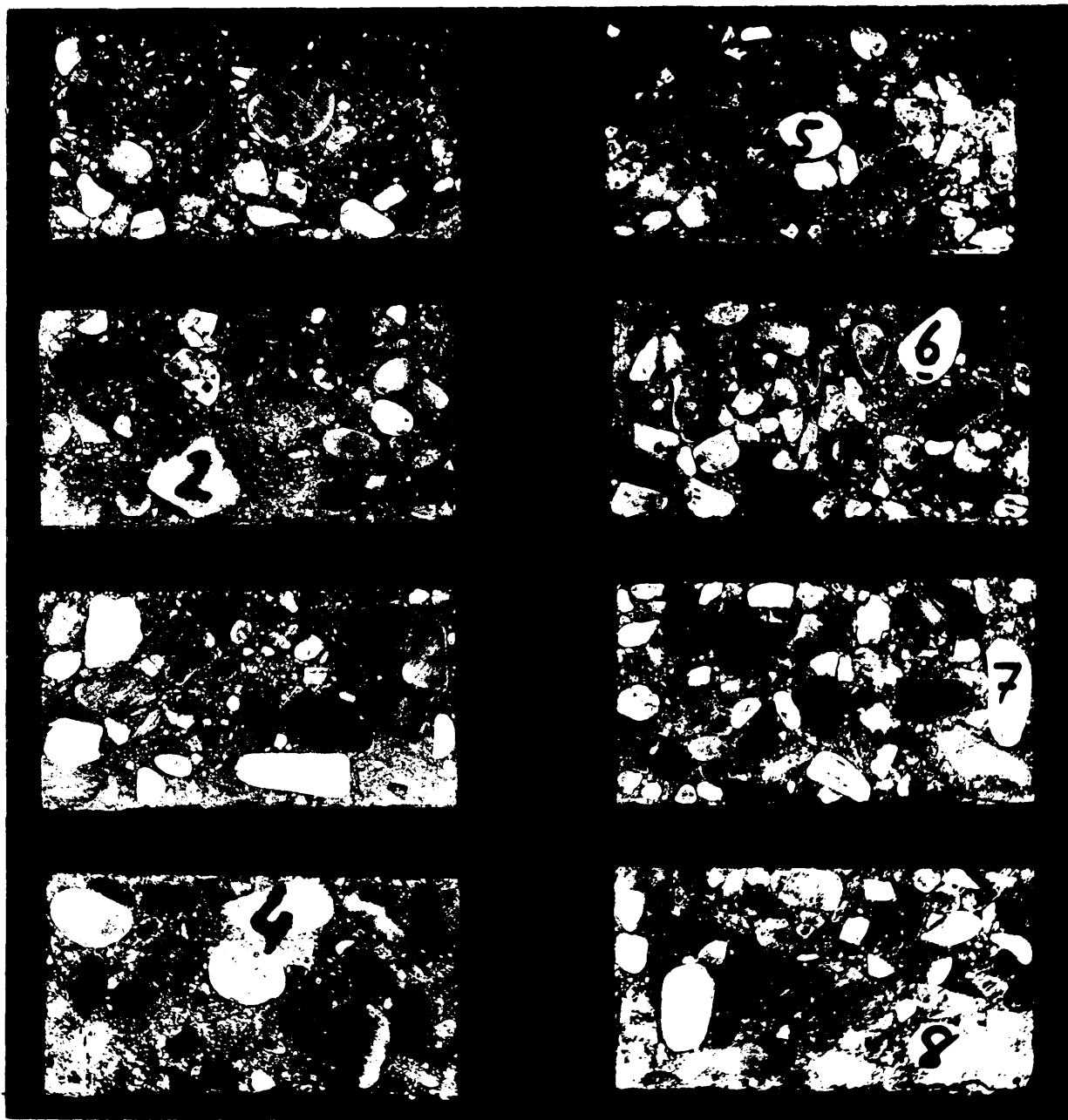


Figura 8

Corte diametral de las probetas. Los números se corresponden con los tipos de dosificación

minuir la proporción de pasta, desde la relación agua/cemento 0,37 a 0,42 se produce un mayor asentamiento del árido grueso, que al ser menos poroso que la pasta hace disminuir la permeabilidad del hormigón. A partir de la relación agua/cemento - 0,42 el asentamiento del árido es menos sensible y se contrarresta su menor porosidad con la mayor porosidad de la pasta. Finalmente, a partir de la relación 0,47 además de la mayor - fluidez de la pasta, que permite un mejor relleno de los huecos entra en juego la hinchazón de la pasta. Esta hinchazón - puede influir al ser pequeña la cantidad de arena empleada y permitir este fenómeno el tamaño de los huecos que dejan los áridos. Hay que tener en cuenta que a medida que disminuye en un mortero la cantidad de arena, se facilita la expansión de la pasta. En la obra de Veniat y Papadakis (33) se incluyen - los siguientes valores medios obtenidos sobre pasta pura y sobre mortero:

Hinchazones comparadas pasta pura-mortero (μ/m)					
Edad	2 días	7 días	28 días	1 año	3 años
Pasta pura	150	230	350	850	1.200
Mortero	30	50	100	290	600

La mayoría de los autores consultados, que han estudiado la - influencia de la relación agua/cemento en la permeabilidad, - han llamado la atención sobre la importancia de ésta alrede - dor del valor 0,50. En las conclusiones relativas a la biblio - grafía (véase: II ANTECEDENTES) se señala que "para obtener -

un hormigón relativamente impermeable es conveniente que la relación agua/cemento no sea superior a 0,55". Kurt Walz (1) estudió 18 relaciones agua/cemento, en una amplitud comprendida entre 0,50 y 1,10; entre ellas, seis tenían relaciones agua/cemento de 0,50 a 0,58. Huart (4) estudió, especialmente, las relaciones agua/cemento variándolas de 0,37 a 0,75 cuyo valor medio es 0,56.

Sabesinsky Felperiu (34) en un trabajo sobre la correspondencia entre el tamaño máximo del árido y la relación agua/cemento señala que la consistencia del hormigón es menos sensible a las variaciones del agua de amasado cuando dicha relación vale 0,50, y, a su vez, la consistencia es independiente del tamaño del árido.

Todo esto va de acuerdo con los tipos de curvas representadas en los gráficos, en los que se observa que para las probetas en iguales condiciones de secado y la misma presión de ensayo, correspondientes a los dos tipos de granulometría, fina y gruesa, guardan una cierta simetría y que presentan el mismo valor de la permeabilidad cuando la relación agua/cemento es del orden de 0,52; lo cual lleva a la conclusión de que existe la posibilidad de que hay un cierto tipo de granulometría para la que la permeabilidad del hormigón es constante, independientemente de la relación agua/cemento dentro de los valores 0,37 a 0,52; y que para la relación 0,52, aproximadamente, dicha permeabilidad es también independiente del tipo de granulometría.

IV.5.3.- Influencia del secado de la masa de hormigón.

Aparte de las referencias que se han hecho sobre la influen -
cia del secado de la masa de hormigón, al analizar los otros
parámetros, se ha preparado el cuadro 42 en el que se incluye
la pérdida de peso de las probetas en función de la temperatu
ra de secado. Para establecerlo se han tomado las tres probe-
tas que se emplearon al deducir la densidad de la masa de hor-
migón (partado IV.2) y la pérdida de peso se refiere a su re-
lación con el peso de ellas secadas a 100°C.

CUADRO 42

PERDIDA DE PESO DE LAS PROBETAS EN TANTO POR CIENTO DE SU PESO.

SECADAS A LA TEMPERATURA DE 100°C

PROBETA		Peso se cada a 100°C	Peso se cada a 80°C	%	Peso se cada a 60°C	%	Peso se cada a 40°C	%	Peso se cada a 20°C	%
P.1	1	2.229,1	2.277,5	2,17	2.284,7	2,51	2.289,5	2,71	2.295,4	2,98
	2	2.314,0	2.340,9	1,16	2.349,1	1,51	2.356,5	1,84	2.358,7	1,93
	3	2.254,0	2.309,0	2,44	2.316,9	2,76	2.324,1	3,08	2.327,7	2,24
P.2	1	2.218,6	2.286,3	3,05	2.291,2	3,27	2.297,5	3,55	2.300,2	3,68
	2	2.228,2	2.300,9	3,27	2.310,6	3,71	2.314,6	3,89	2.317,6	4,02
	3	2.210,1	-	-	-	-	-	-	2.268,5	2,65
P.3	1	2.248,0	2.264,9	0,75	2.270,5	1,00	2.276,4	1,26	2.277,9	1,33
	2	2.213,9	2.234,9	0,94	2.239,5	1,15	2.245,6	1,43	2.247,5	1,51
	3	2.227,8	2.276,9	2,19	2.282,7	2,45	2.290,5	2,80	2.292,4	2,89
P.4	1	2.214,1	-	-	-	-	-	-	2.282,6	3,10
	2	2.217,2	2.289,6	3,27	2.294,2	3,48	2.302,1	3,84	2.304,5	3,95
	3	2.233,0	2.296,0	2,82	2.301,7	3,08	2.308,5	3,38	2.311,0	3,49
P.5	1	2.210,0	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	2.225,9	2.264,7	1,74	2.269,3	1,94	2.279,5	2,40	2.280,5	2,45
	3	2.233,7	2.289,4	2,48	2.295,2	2,74	2.304,5	3,15	2.306,3	3,24
P.6	1	2.222,2	2.274,8	2,38	2.284,2	1,90	2.289,5	3,04	2.284,6	2,82
	2	2.228,8	2.304,7	3,40	2.310,4	3,65	2.316,3	3,92	2.320,3	4,10
	3	2.233,0	2.281,7	2,18	2.287,1	2,42	2.294,4	2,75	2.295,5	2,80
P.7	1	2.220,1	2.298,4	3,53	2.305,1	3,83	2.309,8	4,04	2.313,5	4,21
	2	2.243,2	-	-	-	-	-	-	2.337,5	4,21
	3	2.208,7	2.341,9	6,03	-	-	-	-	2.353,7	6,56
P.8	1	2.190,2	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	2.199,0	2.228,5	1,34	2.233,0	1,55	2.239,8	1,85	2.242,4	1,97
	3	2.191,1	2.224,0	1,51	2.234,1	1,97	2.240,5	2,26	2.243,1	2,38

Los pesos están expresados en pondios.

Tomando los valores medios de cada serie y despreciando los tres valores que, dada su dispersión, no se pueden considerar representativos: correspondientes a P.1.3, para 20°C y P.4.1, para 20°C^x, se obtiene el siguiente cuadro resumen, número 43.

CUADRO 43

PERDIDA DE PESO EN TANTO POR CIENTO EN RELACION CON SU PESO,
SECADAS A 100°C

Serie de probetas	Pérdida de peso, en %			
	80°C	60°C	40°C	20°C
P.1	1,92	2,26	2,54	2,72
P.2	3,16	3,49	3,72	3,85
P.3	1,29	1,53	1,87	1,97
P.4	3,04	3,28	3,61	3,72
P.5	2,11	2,34	2,70	2,84
P.6	2,79	3,03	3,33	3,45
P.7	3,53	3,83	4,04	4,21
P.8	1,40	1,76	2,05	2,17

Los valores deducidos se han representado en el gráfico XLV y los mismos definen una familia de rectas paralelas cuyo coeficiente angular toma un valor de -0,013, con lo que se obtiene

^x Es lógico que las probetas secadas a 20°C (ambiente de laboratorio) ofrezcan cierta dispersión ya que las condiciones climáticas están menos controladas que cuando se secan en una estufa.

la siguiente ecuación:

$$K = -0,013 t + P$$

siendo K el valor en tanto por ciento de la pérdida de peso del hormigón, en relación con su peso secado a 100°C; t, la temperatura de secado en grados centígrados y P un parámetro que depende de las características del hormigón. Esta expresión es válida en el entorno de 20 a 80°C* y para las dosificaciones estudiadas los valores se incluyen a continuación, así como los errores máximos que se pueden cometer al tomar dichos valores (cuadro 44).

CUADRO 44

VALORES DEL PARAMETRO P PARA LAS DOSIFICACIONES ESTUDIADAS

	DOSIFICACIONES							
	GRANULOMETRIA FINA				GRANULOMETRIA GRUESA			
	RELACION AGUA/CEMENTO				RELACION AGUA/CEMENTO			
	0,37	0,42	0,47	0,52	0,37	0,42	0,47	0,52
Valores de P	3,01	4,20	2,29	4,06	3,16	3,80	4,53	2,49
Error máximo %	2,6	2,3	3,3	2,1	2,2	2,6	2,5	3,9

* A partir de 80°C la masa de hormigón empieza a perder parte del agua que había reaccionado químicamente, además de la que quedaba en los poros, por lo que la pérdida de agua total comprende dos sumandos y la pérdida de peso deja de ser lineal.

Valores satisfactorios de acuerdo con lo indicado en el apartado IV.5.1, en relación con los límites de confianza.

La pérdida de peso de las probetas, al secarlas en estufa a temperaturas crecientes se traduce en un aumento de la permeabilidad al aire del hormigón. Este aumento, con relación al valor de la permeabilidad al ambiente del laboratorio (20°C) y deducido de los cuadros 33 al 40 se presenta en el cuadro - 45.

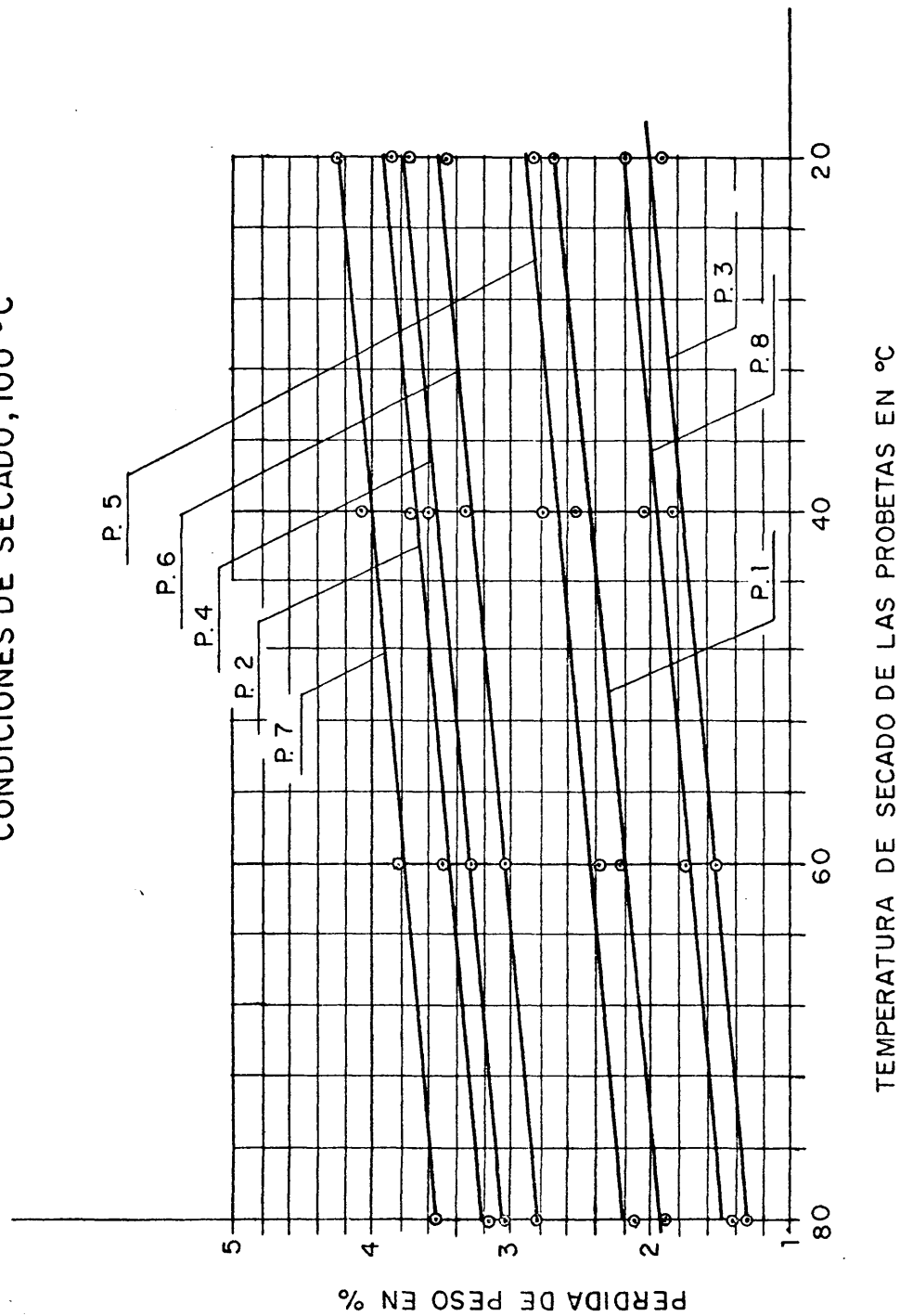
CUADRO 45

AUMENTO DE LA PERMEABILIDAD EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DE SECADO

PRESIONES DE ENSAYO

SERIE DE PRO BETAS	200 mm de Hg			400 mm de Hg			600 mm de Hg			800 mm de Hg		
	$\frac{Q_{40}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{60}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{80}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{40}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{60}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{80}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{40}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{60}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{80}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{40}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{60}}{Q_{20}}$	$\frac{Q_{80}}{Q_{20}}$
P.1	1,13	1,54	2,14	1,18	1,51	2,22	1,14	1,45	2,10	1,18	1,44	2,18
P.2	1,17	1,42	1,94	1,17	1,40	1,91	1,22	1,43	1,99	1,19	1,41	1,98
P.3	1,15	1,37	1,65	1,13	1,40	1,65	1,03	1,35	1,64	1,13	1,35	1,66
P.4	1,23	1,63	2,03	1,26	1,65	2,00	1,29	1,68	2,08	1,25	1,67	1,99
P.5	1,20	1,80	2,50	1,25	1,77	2,45	1,23	1,78	2,49	1,24	1,77	2,49
P.6	1,23	1,69	2,22	1,25	1,67	2,15	1,28	1,67	2,24	1,26	1,69	2,19
P.7	1,20	1,59	2,22	1,20	1,62	2,21	1,18	1,59	2,25	1,17	1,57	2,25
P.8	1,19	1,73	2,12	1,26	1,71	2,12	1,30	1,80	2,19	1,30	1,78	2,12

GRAFICO XLV
PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON
PERDIDA DE PESO EN FUNCION DE LAS
CONDICIONES DE SECADO, 100 °C



Despreciando los dos valores correspondientes: a la serie P.8, para la presión de 200 mm de Hg y la relación Q_{40}/Q_{20} ; y a la serie P.3, para la presión de 600 mm de Hg y la relación Q_{40}/Q_{20} , por su mayor dispersión (dos valores, de los 96 que se incluyen) se obtiene el siguiente cuadro nº 46 de valores medios que resulta independientemente de la presión a que se someten las probetas.

CUADRO 46

AUMENTO DE LA PERMEABILIDAD EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DE
SECADO

Valores medios

Serie de probetas	Q_{40}/Q_{20}	Q_{60}/Q_{20}	Q_{80}/Q_{20}
P.1	1,16	1,48	2,16
P.2	1,19	1,41	1,95
P.3	1,14	1,37	1,65
P.4	1,26	1,66	2,02
P.5	1,23	1,78	2,48
P.6	1,25	1,68	2,20
P.7	1,19	1,59	2,23
P.8	1,29	1,75	2,14

Valores medios que dan una dispersión, sobre los del cuadro anterior, del orden del 2%.

IV.5.4.- Influencia del espesor del hormigón.

Para conocer la influencia que en la permeabilidad del hormigón puede tener su espesor, se han medido los caudales de aire que pasaban a través de probetas de distintos espesores.

La experiencia se ha realizado a continuación de los ensayos sistemáticos y ha consistido en ensayar las probetas P.1.3 y P.6.1 -de granulometría fina y relación agua/cemento 0,37 y - granulometría gruesa y relación agua/cemento 0,42, respectivamente-. Los ensayos se han realizado, secando las probetas en estufa a 45°C hasta peso constante.

El proceso seguido ha sido el siguiente: se han ensayado las dos probetas, P.1.3 y P.6.1, con su espesor de 7 cm. Es decir, se ha repetido la prueba de los ensayos sistemáticos, pero con las probetas secadas a 45°C (con lo que se han obtenido más resultados) y a continuación se han seccionado perpendicularmente a las generatrices; la probeta P.1.3 en dos partes de manera que se obtuvieron dos probetas de espesores 1/3 y 2/3, de ella, y la probeta P.6.1, igualmente, en dos partes que tuvieran la mitad de espesor. De este modo se ha dispuesto de la gama de espesores: 1; 2/3; 1/2 y 1/3.

Los resultados obtenidos han comprobado que el flujo de aire es inversamente proporcional al espesor de la probeta. Dichos resultados, cuyo detalle se incluye en el Anejo nº 1, se presentan a continuación en el siguiente cuadro nº 47.

Los espesores no se corresponden exactamente con las proporciones indicadas de 2/3; 1/2 y 1/3 debido a que, al cortarlas, se pierde el grueso que tiene el disco de la máquina cortadora del hormigón.

CUADRO 47

CAUDALES DE AIRE EN FUNCION DEL ESPESOR e

PROBETA	PRESION DE ENSAYO mm de Hg	ESPESOR DE LA PROBETA											
		e = 1 (7 cm)			e = $\frac{2}{3}$ l (4,5 cm)			e = $\frac{1}{2}$ l (3 cm)			e = $\frac{1}{3}$ l (1,8 cm)		
		Valor obtenido	Valor teórico	Error %	Valor obtenido	Valor teórico	Error %	Valor obtenido	Valor teórico	Error %	Valor obtenido	Valor teórico	Error %
P.1.3	200	68	67	1,5	104	106	2,0	--	--	-	269	264	1,9
	400	149	148	0,7	225	230	2,2	--	--	-	579	573	1,0
	600	242	240	0,8	371	373	0,5	--	--	-	929	932	0,3
	800	343	339	1,2	521	527	1,1	--	--	-	1.320	1.319	0,1
P.6.1	200	363	365	0,5	--	-	-	858	852	0,7	--	--	-
	400	802	803	0,1	--	-	-	1.875	1.873	0,1	--	--	-
	600	1.300	1.288	0,6	--	-	-	2.979	3.006	0,9	--	--	-
	800	1.862	1.847	0,8	--	-	-	4.273	4.309	0,6	--	--	-

Los caudales están expresados en dm^3/hr y m^2 a 760 mm de Hg y 20°C .

Los valores teóricos se han deducido tomando la media aritmética de los resultados obtenidos admitiendo que existe una relación inversa entre el paso del aire y el espesor de la probeta.

IV.5.5.- Coefficientes de permeabilidad.

Los resultados que se han deducido en los apartados anteriores

permiten obtener para una determinada dosificación del hormi -
gón y en unas determinadas condiciones de conservación los -
coeficientes de permeabilidad λ en función de los caudales -
de aire filtrado, del espesor y de la diferencia de presiones
establecida entre las superficies opuestas de la probeta. Di-
chos coeficientes vienen dados por la expresión siguiente:

$$\lambda = \frac{Q \cdot e}{A (1,2 p^2 + 3,5 p)}$$

siendo:

λ : el coeficiente de permeabilidad al aire de un hormigón de -
una dosificación determinada y en unas condiciones de con-
servación, también determinada en cm^3/h y $\text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{bar}$, -
(caudal de aire filtrado en cm^3 por hora y cm^2 de superfi-
cie de una probeta de hormigón de 1 cm de espesor cuando -
entre las dos superficies opuestas hay una diferencia de -
presión de 1 bar).

Q: el caudal de aire filtrado, en cm^3/h a través de la probe-
ta.

e: el espesor del hormigón, en centímetros.

A: la superficie libre de paso del flujo en cm^2 , y

p: la diferencia de presión entre las superficies opuestas del
hormigón, en bars.

A continuación se incluyen los coeficientes de permeabilidad
para los tipos de dosificaciones que se han empleado en el -
trabajo experimental efectuado, (Cuadro 48).

CUADRO 48

COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD DE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS

TIPO DE HORMIGON	CONDICIONES DE SE CADO °C	COEFICIENTE DE PERMEABI LIDAD α
P.1	20	0,80
Relación a/c = 0,37	40	0,93
Granulometría fina	60	1,19
	80	1,74
P.2	20	1,35
Relación a/c = 0,42	40	1,61
Granulometría fina	60	1,91
	80	2,65
P.3	20	1,72
Relación a/c = 0,47	40	1,93
Granulometría fina	60	2,35
	80	2,83
P.4	20	2,04
Relación a/c = 0,52	40	2,73
Granulometría fina	60	3,53
	80	4,31
P.5	20	3,30
Relación a/c = 0,37	40	4,07
Granulometría gruesa	60	5,88
	80	8,21
P.6	20	2,65
Relación a/c = 0,42	40	3,32
Granulometría gruesa	60	4,46
	80	5,84
P.7	20	2,67
Relación a/c = 0,47	40	3,18
Granulometría gruesa	60	4,26
	80	5,97
P.8	20	2,07
Relación a/c = 0,52	40	2,70
Granulometría gruesa	60	3,60
	80	4,43

En el caso de un hormigón con una relación agua/cemento igual a $0,52 \pm 0,01$ se ha visto que el coeficiente de permeabilidad es independiente del tipo de granulometría, por lo que dicho coeficiente es únicamente función de las condiciones de secado.

La expresión analítica que toma es ^{una} función lineal y viene dado por:

$$\lambda = 0,04 t + 1,20$$

Esta expresión sustituida en la ecuación anterior permite obtener los flujos de aire que pasan a través de un hormigón, - cuya relación agua/cemento sea igual a 0,52 en función del espesor, la superficie de paso y la diferencia de presión en - tre las superficies opuestas:

$$Q = \frac{A}{e} (1,2 p^2 + 3,5 p) (0,04 t + 1,20)$$

siendo:

A: la sección de paso, en cm^2 ,

e: el espesor del hormigón, en cm,

p: la diferencia de presión entre las superficies opuestas - del hormigón, en bars,

t: la temperatura de secado del hormigón, en grados centígrados.

Para la comparación de los valores que se obtienen con esta - ecuación con los deducidos experimentalmente, a continuación se exponen los resultados en el siguiente cuadro nº 49.

CUADRO 49

PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON CUYA RELACION AGUA/CEMENTO
ES 0,52 Y CON UN ESPESOR DE 7 CENTIMETROS

Tabla comparativa de los valores experimentales y los calculados
mediante la expresión propuesta

TEMPERATURA DE SECADO DEL HORMIGON	PRESIONES DE ENSAYO		VALORES EXPE RIMENTALES	VALORES TEO RICOS	ERROR RELATIVO EN FUNCION DEL VALOR TEORICO e %
	mm Hg	bar	dm ³ /h y m ²	dm ³ /h y m ²	
AMBIENTE DE LABORATORIO 20°C	200	0,266	149	140	6,4
	400	0,532	321	304	5,6
	600	0,798	512	491	4,3
	800	1,064	746	703	6,1
40°C	200	0,266	181	196	7,6
	400	0,532	406	426	4,7
	600	0,798	665	688	3,3
	800	1,064	948	983	3,6
60°C	200	0,266	251	253	0,8
	400	0,532	541	548	1,3
	600	0,798	892	885	0,8
	800	1,064	1.286	1.265	1,7
80°C	200	0,266	310	309	0,0
	400	0,532	663	669	1,1
	600	0,798	1.090	1.082	0,7
	800	1,064	1.533	1.546	0,8

Analizando los errores medios que corresponden a cada temperara

tura de secado se observa que el hormigón conservado al am -
biente ha dado unos errores superiores a los otros casos. Ello
puede ser debido a que las condiciones climáticas (temperatu-
ra y humedad) de una sala de laboratorio no permanecen tan -
constantes como sucede en el interior de una estufa de secado;
por otra parte, cuanto mayor es la temperatura de secado me -
nor es el error, lo cual es lógico pues se van eliminando va-
riables que influyen en la permeabilidad, como es la variabi-
lidad de la distribución del agua en los poros de la masa de
hormigón.

Considerando todos los valores se obtiene una desviación cua-
drática media en los errores de $S = 2,4$, desviación que no ha-
ce necesario excluir ningún valor, por resultar anómalo, al -
seguir el criterio de selección de Student-Fisher para el um-
bral de la significación del 5%.

Al tratarse de un material tan heterogéneo, como es el hormi-
gón, los errores que proporciona la fórmula se pueden estimar
como aceptables, incluso en el caso del conservado al ambien-
te, por lo que no resulta necesaria la búsqueda de una fun -
ción de errores.

V.- CONCLUSIONES

Del estudio de las propiedades y características del hormigón,
así como de los resultados obtenidos en el trabajo experimen-
tal, se deducen las siguientes conclusiones:

A - Conclusiones respecto a las características del hormigón.

- 1ª - Para obtener un hormigón de carácter impermeable, el tamaño del árido no debe ser menor de 200 micras ni el de cemento mayor de 80 micras.
- 2ª - La granulometría continua del árido favorece la impermeabilidad del hormigón, debiéndose limitar la cantidad de cemento para evitar la retracción excesiva de la pasta.
- 3ª - La cantidad de agua de amasado debe ser mínima, pero compatible con su trabajabilidad. Para un hormigón vibrado, con granulometría continua, la relación agua/cemento de 0,42 a 0,47 permite obtener un hormigón lo más impermeable posible.
- 4ª - Existe un tipo de granulometría para la cual la permeabilidad del hormigón es independiente de la relación agua/cemento.
- 5ª - Para la relación agua/cemento $0,52 \pm 0,01$ la permeabilidad del hormigón se puede considerar que es independiente del tipo de granulometría.
- 6ª - La pérdida de peso del hormigón es una función lineal de la temperatura de secado de su masa, cuya expresión ha sido deducida.

B - Conclusiones respecto al fenómeno de la permeabilidad.

- 1ª - El flujo de aire filtrado a través del hormigón es directamente proporcional a la superficie libre de paso, sin que influya el anillo de guarda ni las dimensiones de la probeta.

- 2a - La permeabilidad del hormigón aumenta al ir secándose su masa, sin que se haya encontrado una expresión que pueda relacionar dicho aumento en función del grado de secado.
- 3a - Para una determinada dosificación del hormigón, secado - a una determinada temperatura, su permeabilidad aumenta de manera inversamente proporcional al espesor del hormigón y directamente proporcional a la segunda y primera - potencia de la diferencia de presión creada entre las superficies opuestas.
- 4a - El conjunto del estudio y trabajo experimental realizado ha permitido proponer una expresión para determinar el - coeficiente de permeabilidad del hormigón en función del caudal Q de aire filtrado a través de una superficie A de hormigón, con un espesor e , cuando se establece entre sus caras opuestas una diferencia de presión p

$$\lambda = \frac{Q \cdot e}{A (1,2 p^2 + 3,5 p)}$$

Esta expresión muestra la correspondencia analógica existente en los fenómenos de difusión: transmisión de calor, transporte de fluidos, transmisión de vapor, corriente - eléctrica, etc.

- 5a - Se ha encontrado una expresión analítica que permite deducir la permeabilidad al aire del hormigón, cuando su - relación agua/cemento es del orden de $0,52 \pm 0,01$.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS
=====

- 1.- WALZ K. "Die Durchlässigkeit des Betons Gegen Druckluft". Fortschritte und Forschungen im Bauwesen, Vol. 9, año 1943, pág. 21 a 28.
- 2.- YOSHU T. "Permeabilidad al aire del hormigón". Semento Gijutsu Neupo, nº 12, año 1954, pág. 339 a 343.
- 3.- WATANABE K. "Permeabilidad al aire del hormigón". Semento Gijutsu Neupo, nº 12, año 1958, pág. 343 a 347.
- 4.- HUART A. "La perméabilité des betons aux gaz". Chimie Industrie, Volumen 82, diciembre 1959, nº 6, pág. 839 a 847.
- 5.- LABORATOIRES ROUTIERS. Publicación del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris.
- 6.- GENET A. "Perméamètre à beton utilise au Laboratoire Regional de Lyon". Bull. des Liaison des Laboratoires Routiers, nº 20, Julio-Agosto 1966, pág. 1 a 44.
- 7.- MEULEN Y DIJK "A permeability - Testing apparatus for concrete". Magazine of Concrete Research, nº 67, Junio 1969, pág. 121 a 123.
- 8.- SCHWIELE, BHOME y LUDWIG. "Measuring gas diffusion for the valuation of open porosity on mortars and concretes". Materiaux et - Construction (RILEM), nº 7, Enero-Febrero 1969, pág. 43 a 48.
- 9.- SCHWIELE y BOHME. "Bestimmung der affektiven Porositat von Beton durch Gass diffusionsmessungen". Zement-Kalk-Gips, nº 3, año 1970, pág. 125 a 134.
- 10.- NIGAM P.S. "Permeability of Concrete". The Indian Concrete Journal, Vol. XXVIII, Abril 1954, nº 4, pág. 122 a 124.
- 11.- POWERS, COPELAND, HAYES y MANN. "Permeability of Portland cement paste", Noviembre 1954, pág. 285 a 298.

- 12.- TYLER y ERLIN. "Méthode d'essai simple, proposée pour la détermination de la perméabilité du béton" (texto en inglés). J. Res. Development Lab. USA, nº 3, Septiembre 1961, pág. 2 a 7.
- 13.- TILLER y SHIRATO. "The role of porosity in filtration. New definition of filtration resistance". Bull. RILEM, nº 27, Junio 1965, pág. 77 a 85.
- 14.- RUTH B.F. Ind. Eng. Chem. 25, 153, año 1933.
- 15.- MURATA J. "Studies on the permeability of concrete". Bull RILEM, número 29, Diciembre 1965, pág. 47 a 54.
- 16.- BONZEL J. "Der Einfluss des zements, des W/z - Wertes, des Alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons". Beton, nº 9, Septiembre 1966, pág. 379 a 383.
- 17.- WEIGLER R. "Zur Prüfung der Wasserundurchlässigkeit von Beton". Betonstein - Ztg, Dtsch, nº 5, Mayo 1963, pág. 260 a 262.
- 18.- WIERIG H.J. "Ein einfaches Verfahren zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Mörtel und Beton". Zement-Kalk-Gips, número 4, Abril 1963, pág. 125 a 130.

"Die Wasserdampfdurchlässigkeit von Zement mortel und Beton". Zement-Kalk-Gips, nº 9, Septiembre 1965, página 471 a 482.
- 19.- LAFUMA H. "Liants Hydrauliques", Dunod, Paris-ed. 1952.
- 20.- BUREAU OF RECLAMATION USA. "Manual del hormigón", traducción al español, año 1954.
- 21.- WALZ, K. "Beton - zusatzmittel". Zement-Kalk-Gips, nº 7, Julio de 1952, pág. 230.
- 22.- KLIEGER, P. "Effect of Entrained Air on Concretes Made with SO-Called; Sand-Gravel Aggregates", nº 2, Octubre 1948, pág. 149 a 163.
- 23.- EH-73. Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa o armado. Ministerio de Obras Públicas. Madrid.

- 24.- EISENBERG y KAUFMANN. "The Structure and Properties of Water". Oxford, At the Clarendon Press, 1969.
- 25.- BLANKS, R.F. "Modern concepts applied to concrete aggregate". Proceedings-American Society of Civil Engineers, nº 5, Abril 1949, pág. 441 a 468.
- 26.- EN-3. Gabinete de Aplicaciones Nucleares a las Obras Públicas, Publicación EN-3. Ministerio de Obras Públicas. Madrid.
- 27.- ARREDONDO F. Dosificación de hormigones. Colección "Normas y Manuales" del Instituto E. Torroja. Madrid.
- 28.- KRIEGER, P. Journal of the American Concrete Institute, año 1949, volumen nº 45, pág. 148.
- 29.- DUHOUX L. La compacité des betons. Methodes de mesure. Resultats Publication Technique du CERILH 28/30. 1963.
- 30.- POWER Research laboratories of the Portland Cements Association. Bull. nº 29 de 1949.
31. VERBECK G.H. "Hardened Concrete Pore structure". Research and Development Laboratoires of the Portland Cement Association, - Agosto 1956.
- 32.- CARMAN P.C. L'ecoulement des Gaz a Travers les milieux poreux. Editado por el Institut National des Sciences et Techniques - Nucleares. 1961.
- 33.- VENIAT y PAPADAKIS. Control y ensayo de cementos, morteros y hormigones. Ediciones Urmo - Bilbao (párrafo 7.63. Hinchazón).
- 34.- SABESINSKY FELPERIN M. Hormigones de cemento Portland con agregados normales. Relación entre el tamaño máximo del esqueleto granular y el agua de amasado para distintas consistencias y relaciones agua/cemento. Publicado en "Ultimos Avances de Materiales de Construcción", Julio-Agosto-Septiembre 1971. Instituto E. Torroja.

BIBLIOGRAFIA
=====

- P.C. CARMAN L'Ecoulement des gaz a travers les milieux poreux. Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Nucleares. SACLAY 1961.
- M. MUSKAT Flow of homogeneous fluids through Porous Media. Mc Graw-Hill 1937.
- EVERETT-STONE The Structure - Properties of Porous Materials.
- C. MARLE Application des méthodes de la thermodynamique des processus irréversibles a l'écoulement d'un fluide à travers un milieu poreux. Bull. Rilem, nº 29, Diciembre 1965.
- A.E. SCHEIDEGGER The Physics of Flow Through Porous Media. Universidad de Toronto, 1963.
- SCHWIEDE y BOHME Bestimmung der affektiven Porosität von Beton durch - Gassdiffusionsmessungen. Zement-Kalk-Gips, nº 3, año 1970.
- W.G. POLLARD y R.D. PRESENT. On Gaseous Self-Diffusion in Long Capillary Tubes. Physical Review, nº 7, Abril 1948.

A large, stylized handwritten signature in black ink, possibly reading 'R. M.', is written across the lower half of the page.